



CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR
DE INGENIEROS DE LA
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



**COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS
TRADICIONALES Y NOVEDOSAS DE VERIFICACIÓN
GEOMÉTRICA DE MÁQUINAS-HERRAMIENTA**

PROYECTO FIN DE CARRERA PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

JORGE AGUADO LAMANA

Dirigido por JORGE SANTOLARIA MAZO
Codirigido por JOSÉ ANTONIO YAGÜE FABRA

Junio 2010



*Departamento de Ingeniería de
Diseño y Fabricación*

Comparación experimental de técnicas tradicionales y novedosas de verificación geométrica de máquinas-herramienta.

RESUMEN

El objetivo principal del proyecto es la comparación de diferentes métodos de verificación geométrica de máquinas-herramienta (MH) para determinar sus errores geométricos y realizar su compensación. Dicha comparación se realiza con métodos tradicionales y con métodos novedosos que persiguen una disminución del tiempo y coste de esta operación.

El proyecto se centra en los errores geométricos de una MH (errores de posición, angulares, de rectitud y de perpendicularidad). Se describen los distintos métodos usados para determinar dichos errores con la máquina en vacío (sin pieza y sin mecanizar) mediante movimientos de la misma. Se lleva a cabo una intensa experimentación sobre una fresadora de control numérico a la que se aplican diferentes métodos para poder encontrar experimentalmente qué método es mejor desde los puntos de vista de precisión, tiempo y coste. Los métodos que se comparan son el interferómetro láser, el nivel electrónico, el reloj comparador electrónico, el palpador autocentrante con barra de esferas y el láser-tracker.

Para poder llevar a cabo este proceso, se realizan además diversos trabajos previos. En primer lugar, se calibra un palpador autocentrante mediante la repetida medida de un patrón y el posterior análisis de los datos contrastado con el modelo informático del palpador, que transforma las medidas de los sensores en la posición del centro de la esfera medida.

También se realiza un programa que genera automáticamente programas de control numérico para trayectorias de medidas para el láser-tracker. Gracias a este programa se genera un código que mueve el cabezal por todo el volumen que especifica el usuario y se detiene en los distintos puntos el tiempo definido por el usuario para tomar datos con el láser-tracker.

Por último se indica cómo compensar los errores de las posiciones que se encuentran dentro de la nube de puntos de la que hemos encontrado el error. Este sistema sería el primer paso para una compensación pre-proceso que permita crear un programa que genere el código de control numérico con las posiciones corregidas y enviar a la máquina a un punto más cercano.

Indice

Capítulo 1. Introducción.....	7
1.1 Justificación del proyecto. Comparación de técnicas de verificación geométrica y trabajo previo.....	7
1.2 Objetivos y estructura del proyecto	9
Capítulo 2. Calibración de un palpador autocentrante.....	13
2.1 Introducción y objetivos.....	13
2.2 Resultados.....	13
Capítulo 3. Ensayos y resultados.....	21
3.1 Explicación y condiciones de ensayo.....	21
3.2 Interferómetro láser.....	23
3.2.1 Error de posición xPx.....	24
3.2.2 Error de rectitud xTy.....	27
3.2.3 Error de rectitud xTz.....	29
3.2.4 Error de cabeceo xRy.....	30
3.2.5 Error de rumbo xRz.....	31
3.2.6 Error de perpendicularidad xWy.....	32
3.2.7 Error de perpendicularidad xWz.....	33
3.3 Nivel electrónico.....	34
3.3.1 Error de cabeceo xRy.....	34
3.3.2 Error de vuelco xRx.....	35
3.4 Reloj comparador electrónico.....	36
3.4.1 Error de rectitud xTy.....	35
3.4.2 Error de rectitud xTz.....	36
3.4.3 Error de perpendicularidad xWy.....	36
3.5 Láser-tracker.....	37
3.5.1 Error de posición xPx	38
3.5.2 Error de rectitud xTy	39
3.5.3 Error de rectitud xTz.....	40
3.5.4 Error de rumbo xRx	41
3.6 Palpador autocentrante y barra de esferas.....	41
3.6.1 Error de posición xPx.....	41
3.6.2 Error de rectitud xTy.....	42
3.6.3 Error de rectitud xTz.....	43
Capítulo 4. Comparación de resultados.....	45
4.1 Error de posición xPx.....	45
4.2 Error de rectitud xTy.....	46
4.3 Error de rectitud xTz.....	47
4.4 Error de cabeceo xRy.....	48

4.5 Error de rumbo xRz.....	49
4.6 Error de perpendicularidad xWy.....	49
4.7 Comparación global.....	50
4.8 Análisis económico.....	51
Capítulo 5. Generación de software informático.....	57
5.1 Utilización de herramientas informáticas.....	57
5.2 Creación de un programa generador de código CNC.....	58
5.3 Generación de un programa para el cálculo de los valores de compensación....	59
5.3.1 Resultados obtenidos para la MH ensayada.....	60
Capítulo 6. Conclusiones.....	61
6.1 Tareas realizadas.....	61
6.2 Trabajos futuros.....	65
Bibliografía.....	67
Anexos.....	69
Anexo 1. Errores y comportamiento en una MH.....	71
A1.1 Verificación de una Máquina-Herramienta.....	71
A1.2 Causas de error en las MH.....	74
A1.3 Comportamiento en una MH.....	76
A1.3.1 Comportamiento geométrico.....	78
A1.3.2 Las 21 componentes del error geométrico.....	80
A1.3.3 Errores geométricos en ejes rotativos.....	82
A1.3.4 Comportamiento estático.....	83
A1.3.5 Comportamiento cinemático.....	84
A1.3.6 Comportamiento termoelástico.....	85
A1.4 Errores del sistema de control.....	86
A1.5 Resumen.....	88
Anexo 2. Evolución de las técnicas de verificación de MH.....	89
A2.1 Visión histórica de las técnicas de verificación.....	89
A2.2 Técnicas directas de verificación.....	90
A2.2.1 Medición directa de errores de máquina bajo carga.....	91
A2.2.2 Técnicas para la verificación geométrica.....	93
A2.2.3 Técnicas tradicionales.....	94
A2.2.4 Láser convencional (interferómetro láser).....	94
A2.2.5 Ball-bar telescópico.....	97
A2.2.6 Autocolimador.....	98
A2.2.7 Láser de alineamiento.....	99
A2.2.8 Sistemas comparadores.....	99
A2.2.9 Regla de rectitud / Escuadra de perpendicularidad.....	100
A2.2.10 Nivel de medida.....	101
A2.2.11 Técnicas novedosas.....	102

A2.2.12	Láser volumétrico.....	102
A2.2.13	Regla comparadora lineal.....	103
A2.2.14	Láser-tracker.....	104
A2.2.15	Cross Grid Encoger.....	107
A2.2.16	Láser Ball-bar.....	108
A2.2.17	Técnicas que usan artefactos patrón y palpadores.....	109
A2.3	Comparativa entre métodos directos de verificación.....	111
A2.4	Métodos indirectos de verificación (Verificación funcional).....	112
Anexo 3.	Principio de funcionamiento y proceso de calibración de un palpador autocentrante.....	115
A3.1	Principio de funcionamiento de un palpador autocentrante.....	115
A3.1.1	Definición de las direcciones de palpado.....	116
A3.1.2	Definición de los planos de palpado.....	117
A3.2	Cálculo del centro de una esfera.....	119
A3.3	Proceso de calibración.....	122
A3.3.1	Sistema de calibración.....	123
A3.3.2	Ensayo.....	124
Anexo 4.	Compensación de errores geométricos en MH.....	127
A4.1	Evolución de los métodos de compensación de errores geométricos.....	127
A4.2	Compensación de errores geométricos.....	129
A4.2.1	Modelización matemática de los errores.....	129
A4.2.2	Método basado en la corrección de errores geométricos en Máquina de Medir por Coordenadas.....	130
A4.2.3	Método basado en Matrices de Transformación Homogéneas.....	137
A4.3	Métodos basados en software de compensación.....	143
A4.3.1	Añadir módulo adicional.....	143
A4.3.2	Modificación de parámetros de control.....	145
A4.3.3	Compensación por pos-procesador.....	147
A4.4	Tendencias futuras en la compensación de máquina-herramienta.....	148
A4.4.1	Compensación volumétrica del error (VEC).....	149
Anexo 5.	Principio de medida y metodología experimental de técnicas de verificación.....	153
A5.1	Interferómetro láser.....	153
A5.1.1	Metodología experimental para el interferómetro láser.....	154
A5.1.2	Error de posición xPx.....	157
A5.1.3	Error de rectitud xTy.....	157
A5.1.4	Error de rectitud xTz.....	158
A5.1.5	Error de cabeceo xRy.....	159
A5.1.6	Error de rumbo xRz.....	159
A5.1.7	Error de perpendicularidad xWy.....	160
A5.1.8	Error de perpendicularidad xWz.....	161
A5.2	Nivel electrónico.....	162
A5.2.1	Metodología experimental para el nivel electrónico.....	162
A5.2.2	Error de cabeceo xRy.....	163

A5.2.3 Error de vuelco xRx.....	164
A5.3 Reloj comparador electrónico.....	164
A5.3.1 Metodología experimental para el palpador inductivo.....	164
A5.3.2 Error de rectitud xTy.....	165
A5.3.3 Error de rectitud xTz.....	166
A5.3.4 Error de perpendicularidad xWy.....	166
A5.4 Láser-tracker.....	167
A5.4.1 Metodología experimental para el láser-tracker.....	167
A5.4.2 Toma de datos.....	168
A5.4.3 Principio matemático para hallar los errores.....	170
A5.5 Palpador autocentrante y barra de esferas.....	176
A5.5.1 Cálculos previos.....	177
A5.5.2 Error de posición xPx.....	180
A5.5.3 Error de rectitud xTy.....	182
A5.5.4 Error de rectitud xTz.....	182
A5.5.5 Error de cabeceo xRy.....	182
A5.5.6 Error de rumbo xRz.....	183
A5.5.7 Error de vuelco xRx.....	183
A5.5.8 Error de perpendicularidad xWy.....	184
Anexo 6. Principio de funcionamiento y manual de los programas creados....	185
A6.1 Manual del programa generador de código CNC.....	185
A6.2 Programa generador de tabla de compensación.....	188
A6.2.1 Modelo matemático del error.....	188
A6.2.2 Manual del programa generador de tabla de compensación.....	190
Anexo 7. Comparación histórica de resultados.....	193
A7.1 Error de posición xPx.....	193
A7.2 Error de rectitud xTy.....	195
A7.3 Error de rectitud xTz.....	195
A7.4 Error de cabeceo xRy.....	196
A7.5 Error de vuelco xRx.....	197

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación del proyecto. Comparación de técnicas de verificación geométrica y trabajo previo

El proceso de verificación geométrica de una máquina-herramienta es fundamental para averiguar, evaluar y contrarrestar los errores que se cometen en la mecanización de una pieza (Anexo 1). Para ello es necesario realizar ensayos geométricos de la máquina que determinen dichos errores, trabajar con ellos mediante diversos métodos matemáticos para hallar unos parámetros de compensación e introducirlos en el código CNC para poder corregirlos.

Actualmente es posible encontrar gran variedad de métodos para llevar a cabo esta verificación geométrica (Anexo 2). Cada uno de estos métodos consume un determinado tiempo para su realización, lo que implica costes por la consecuente parada en la producción. Además del tiempo consumido, los equipos necesarios para llevar a cabo los test geométricos cuestan una cantidad de dinero y ofrecen distinta fiabilidad. Por tanto, la mayoría de los usuarios de MH no revisan los factores y parámetros de compensación a introducir en el CNC con la frecuencia con que se debería, lo que hace que las máquinas pierdan precisión y den lugar a rechazos al cabo del tiempo en las piezas.

En este proyecto se va a comentar cómo han evolucionado las técnicas de verificación geométrica de MH y se explicará cada uno de estos métodos (Anexo 2). También se analizarán las características de todos ellos para poder identificar sus ventajas e inconvenientes.

Además se explica el proceso de compensación de los errores geométricos de máquinas CNC como proceso final de un ensayo de verificación (Anexo 4) y se facilita la aplicación a un caso real como ampliación del trabajo realizado. En este paso se genera un sencillo programa que permite calcular rápidamente la compensación necesaria en la máquina para mejorar su comportamiento tras realizar la verificación geométrica.

También se realiza durante este estudio una comparación experimental entre varios sistemas de verificación. Dicho proceso experimental se lleva a cabo en el taller del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza en una fresadora de control numérico. Para esta comparación se toman datos de métodos tradicionales de verificación geométrica (reglas de rectitud con relojes comparadores y niveles), métodos basados en interferometría láser (interferómetro y láser-tracker) y métodos innovadores (palpador autocentrante). Gracias a este proceso se completa y actualiza el estudio previamente realizado en el Departamento al añadir un nuevo método, el láser-tracker, y volver a tomar medidas con los métodos tradicionales. Con los datos obtenidos de todos estos ensayos se pasa al proceso matemático de obtención de los factores de compensación, el cual precisa unos datos actualizados para proporcionar una solución adecuada.

En este proceso experimental, se toma como base el trabajo ya realizado que detalla la metodología experimental a seguir en el uso de las distintas técnicas [10]. El estudio previo sobre el palpador autocentrante [10] es de gran ayuda al tratarse de una nueva tecnología no muy conocida. Así pues se ha partido de la metodología de ensayo desarrollada, aprendiendo de los errores cometidos anteriormente y se procede de la forma adecuada desde el principio llegando a unas conclusiones actualizadas.

Esta comparación de métodos de verificación geométrica así como la compensación de errores que con ellos se realiza y cuyas bases se presentan posteriormente, pretende exponer de forma clara y precisa las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos además de aclarar su metodología de ensayo.

El presente trabajo forma parte de un proyecto global más ambicioso llevado a cabo en el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza y que tiene relación con la verificación de máquina-herramienta. Así pues, este proyecto fin de carrera parte del trabajo previamente realizado en el departamento tomándolo como base para aprender de los errores cometidos y rectificarlos si se da el caso y para completarlo en los puntos en que sea necesario. De esta manera se propondrán también los posibles trabajos futuros a realizar así como se facilitará el camino proponiendo las herramientas de uso y especificando los puntos que no se han alcanzado o no se han realizado de forma correcta.

La evolución que se ha seguido en el trabajo de verificación de máquina-herramienta dentro del Departamento ha realizado y pretende realizar las siguientes tareas, ordenadas cronológicamente:

- Experiencia en verificación de máquina-herramienta (MH) con interferómetro láser y métodos tradicionales (comparadores, niveles, etc): desde la década de los 80.
- Verificación de máquinas de medir por coordenadas (MMC) con patrones de esferas: desde la década de los 90.
- Desarrollo de palpadores autocentrantes y métodos de verificación de MH con barras de esferas: participación en el proyecto europeo "MT-Check" desde el año 2000 al 2004.
- Primeras comparaciones entre diferentes métodos de verificación, incluyendo el uso de los primeros prototipos de palpadores autocentrantes: finales de 2004.
- Estudio de nuevos sensores y principios de diseño para optimizar los palpadores autocentrantes: 2005 y 2006.
- Optimización del tamaño y el coste de los palpadores autocentrantes (a coste de una pequeña disminución de precisión que no resulta crítica en la verificación de MH): proyecto nacional de I+D "OVeGe-MH" de 2007 a 2009.
- Primeros estudios de diferentes métodos de verificación de MH de diferentes tamaños, especialmente grandes. Utilización de Láser Trackers (LT) en colaboración con la empresa Metromecánica: 2009.

- Desarrollo de métodos de verificación de MH de diferentes tamaños, especialmente grandes. Utilización de LT y comparación con sistemas de verificación previos para conocer su idoneidad: proyecto nacional Singular Estratégico "Alexandria" de finales de 2009 a finales de 2012.

El presente proyecto, se sitúa, tanto cronológicamente como en función del trabajo previo que se toma como base, entre los dos últimos puntos (Fig. 1.1-1). Si bien no entra dentro del proyecto "Alexandria", si que incorpora resultados y estudios útiles para el mismo. Además va más allá de los primeros estudios realizados con LT pues se utilizan los datos obtenidos para una primera aproximación a la verificación de MH y se comparan las características de esta técnica con las de las técnicas estudiadas anteriormente.

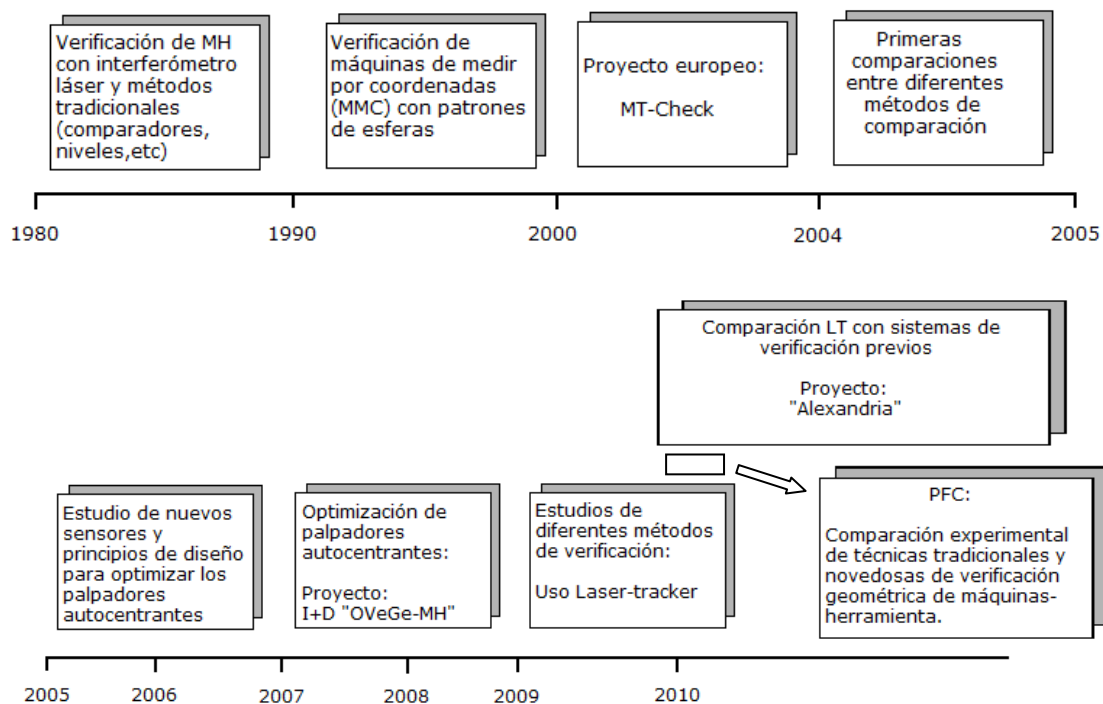


Figura 1.1-1 Esquema temporal de los trabajos realizados en el departamento en relación a la verificación de máquina-herramienta

1.2 Objetivos y estructura del proyecto

Como el título indica y como se ha explicado en el apartado anterior, el presente proyecto pretende realizar una comparación experimental de técnicas tradicionales y novedosas de verificación geométrica de máquinas-herramienta. Por lo tanto el principal objetivo del mismo será presentar y comparar las distintas características de estas técnicas.

Otro de los objetivos es el de aclarar y convencer de la necesidad de verificación de las máquinas-herramienta durante su vida útil así como aclarar las posibles causas que provocan los errores que en ella se originan.

Por último se pretende marcar las líneas de trabajo futuro proponiendo y generando nuevas herramientas y avances que permitan el estudio y desarrollo de técnicas novedosas de verificación geométrica.

Para conseguir este propósito final y alcanzar los objetivos marcados, el proyecto se divide en diferentes apartados dentro de los cuales se realizan distintas tareas que permitirán ir dando cuerpo al estudio y afianzar poco a poco las ideas que permitan alcanzar las conclusiones finales. Estos apartados y tareas son:

- 1- Calibración de un palpador autocentrante. Explicación del procedimiento seguido en su calibración para establecer la metodología de calibración de este tipo de aparatos. (Capítulo 2)
- 2- Experimentación con distintos métodos de verificación geométrica. Se verifica el eje X de una máquina-herramienta real (una fresadora CNC) con cinco métodos diferentes para conseguir los errores geométricos que proporcionan cada uno de ellos. Los métodos usados son:
 - Interferómetro láser
 - Láser-tracker
 - Nivel electrónico
 - Reloj comparador electrónico (Palpador inductivo) y regla de rectitud
 - Barra de esferas y palpador autocentrante

Además se incluyen las condiciones de ensayo y los resultados obtenidos. (Capítulo 3)

- 3- Comparación de resultados. Se compara para cada error la solución dada por cada uno de los métodos y se evalúa el grado de precisión alcanzado por cada uno de ellos. (Capítulo 4)
- 4- Generación y utilización del software necesario, explicando las funciones que tienen las herramientas informáticas utilizadas. Cabe destacar en este apartado la creación de un programa generador de trayectorias para máquinas CNC que se realizó durante este proyecto y otro programa que calcula una tabla de compensación para una MH de la que se conocen los errores geométricos. (Capítulo 5)
- 5- Exposición de las conclusiones finales alcanzadas y planteamiento de los posibles trabajos futuros a realizar en base al trabajo realizado. (Capítulo 6)

Finalmente se exponen en los últimos apartados la bibliografía consultada ordenada por orden alfabético (según el apellido del primer autor) y los anexos, en donde se explican profundamente las ideas planteadas en el núcleo de este proyecto fin de carrera así como las metodologías a seguir para la realización de los ensayos con los

métodos utilizados en el apartado experimental y los manuales de usuario de los programas generados en Visual Basic.

Capítulo 2. Calibración de un palpador autocentrante

2.1 Introducción y objetivos

La toma de datos con un palpador autocentrante (Anexo 2) es una técnica fiable y rigurosa que proporciona la situación geométrica de los centros de las esferas de los patrones de forma precisa. La posición de la esfera se calcula mediante su palpado a partir de las lecturas dadas por los 3 sensores lineales (*linear encoders* - LEs) y con respecto al sistema de referencia definido sobre el palpador. Se hace necesario pues, conocer el funcionamiento del palpador y los parámetros que nos permiten conocer el centro de las esferas para poder optimizarlos y que los datos que nos de esta técnica sean veraces y consistentes y no impliquen ningún error de cálculo (Anexo 3).

En el presente proyecto, se utiliza para la toma de datos un modelo de tres palpadores con punta plana, por lo tanto este va a ser el tipo de palpador para el que se va a explicar el método de calibración. Sin embargo los distintos tipos de aparatos (cuatro palpadores, puntas esféricas...) podrán usar estos conceptos alterando ligeramente sus procedimientos.

2.2 Resultados

Se ha llevado a cabo la medición de cinco series de palpado con 42 posiciones en cada una de estas series, 6 posiciones distintas en cada una de las caras del cubo: A, B, C, D, E y F más el palpado de la posición 1B en cada uno de los cambios de una cara a otra del cubo con el objetivo de disponer de una posición de referencia para compensación de variaciones térmicas (Anexo 3). Estos resultados se almacenan en hoja Excel (figura 2.2-1) que facilitan su tratamiento.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Posicion	Xpalp	Ypalp	Zpalp	Xcubo	Ycubo	Zcubo	X sin transf	Y sin transf	Z sin transf		
2	1	B	-0.17560	-0.34700	0.00140	-0.1756	-0.3470	0.0014	1.79966919	-0.22107832	0.77558
3	1	A	0.06510	-0.18430	0.39540	0.0582	-0.1870	0.3934	1.55059131	-0.36991819	0.38099373
4	1	C	-0.18580	0.04120	0.39390	-0.1908	0.0421	0.3936	1.7869	-0.6104	0.38390729
5	1	D	-0.20530	0.33310	-0.00240	-0.2121	0.3257	0.0009	1.78689474	-0.90168728	0.78087896
6	1	E	0.13350	0.14400	0.39290	0.1323	0.1438	0.3936	1.4618	-0.6935	0.38387187
7	1	F	0.39800	0.01660	-0.00040	0.3894	0.0207	0.0017	1.2045	-0.5488	0.77590978
8	1	B	-0.17580	-0.34660	0.00130	-0.1756	-0.3470	0.0014	1.7998	-0.2215	0.77564235
9	2	A	-0.05050	-0.43160	-0.27710	-0.0524	-0.4331	-0.2771	1.6792	-0.1261	1.05342773
10	2	B	-0.50860	-0.49990	-0.67870	-0.5119	-0.5046	-0.6768	2.1393	-0.0857	1.45661954
11	2	C	-0.34050	0.26390	-0.28060	-0.3491	0.2607	-0.2777	1.9252	-0.8400	1.05950655
12	2	D	-0.17030	0.69660	-0.68450	-0.1809	0.6958	-0.6780	1.7270	-1.2601	1.46359167
13	2	E	0.40480	0.16550	-0.26030	0.3993	0.1709	-0.2779	1.1874	-0.6961	1.05607934
14	2	F	0.69710	-0.19890	-0.67990	0.6936	-0.1915	-0.6773	0.9171	-0.3132	1.45384447
15	1	B	-0.17560	-0.34680	0.00120	-0.1756	-0.3470	0.0014	1.7996	-0.2212	0.7755784
16	3	A	0.04910	-0.74850	1.22170	0.0517	-0.7511	1.2186	1.6045	0.1896	-0.44637977
17	3	B	-0.63260	-0.56850	0.87080	-0.6337	-0.5779	0.8688	2.2726	-0.0308	-0.09250264
18	3	C	-0.66640	0.34310	1.21600	-0.6768	0.3307	1.2183	2.2505	-0.9437	-0.43667837
19	3	D	-0.17050	0.84360	0.85380	-0.1831	0.8387	0.8663	1.7232	-1.4118	-0.08438208
20	3	E	0.63330	0.41570	1.21580	0.6247	0.4217	1.2169	0.9487	-0.9366	-0.44039079
21	3	F	0.82050	-0.26690	0.86970	0.8180	-0.2590	0.8676	0.8034	-0.2427	-0.09635678
22	1	B	-0.17530	-0.34700	0.00110	-0.1756	-0.3470	0.0014	1.7993	-0.2210	0.77587334
23	4	A	-0.03420	-1.16640	-0.92910	-0.0301	-1.1640	-0.9323	1.7066	0.6083	1.70383748
24	4	B	-1.09780	-0.66910	-1.30990	-1.1002	-0.6785	-1.3110	2.7359	0.0481	2.08976488
25	4	C	-0.98120	0.61720	-0.93890	-0.9926	0.6070	-0.9334	2.5405	-1.2297	1.72101078
26	4	D	-0.02220	1.29050	-1.31940	-0.0374	1.2918	-1.3112	1.5401	-1.8418	2.09919901
27	4	E	1.03070	0.54220	-0.93760	1.0215	0.5553	-0.9336	0.5371	-1.0316	1.71174043
28	4	F	1.13680	-0.62820	-1.30940	1.1376	-0.6135	-1.3107	0.5030	0.1441	2.08076991
29	1	B	-0.17570	-0.34680	0.00130	-0.1756	-0.3470	0.0014	1.7998	-0.2212	0.77569993
30	5	A	1.57540	0.14770	2.37140	1.5665	0.1608	2.3699	0.0290	-0.6150	-1.60014294
31	5	B	0.82850	-1.57750	2.02850	0.8538	-1.5709	2.0228	0.8809	1.0621	-1.2579361
32	5	C	0.65300	1.43700	2.37010	0.6443	1.4369	2.3700	0.8700	1.61251155	

Figura 2.2-1
Aspecto del
archivo Excel
en el que se
guardan los
datos tomados
por el
palpador

Antes de llegar a las series definitivas de datos, se debe asegurar la repetibilidad de los mismos entre series. Una desviación excesiva entre lecturas cuyos valores deberían ser los mismos denota algún tipo de fallo en el palpador, lo que inutiliza los datos tomados debido al error aleatorio introducido por este fallo. Una de las causas más frecuentes de error se introduce debido al aflojamiento de tuercas y roscas que conforman el aparato, fenómeno que apareció durante la realización de este ensayo y que propició la consiguiente repetición de toma de datos (Fig. 2.2-2). Otra de las causas de incoherencia en las medidas, apareció con la transformación de las lecturas en posiciones de centro de las esferas, debido a que los sensores estaban girados cierto ángulo y por lo tanto el modelo matemático que se basa en asociar ejes de referencia a cada encoder, daba resultados muy alejados de la realidad. Esto hizo que de nuevo se tuvieran que repetir las medidas una vez colocados los sensores en su posición habitual.

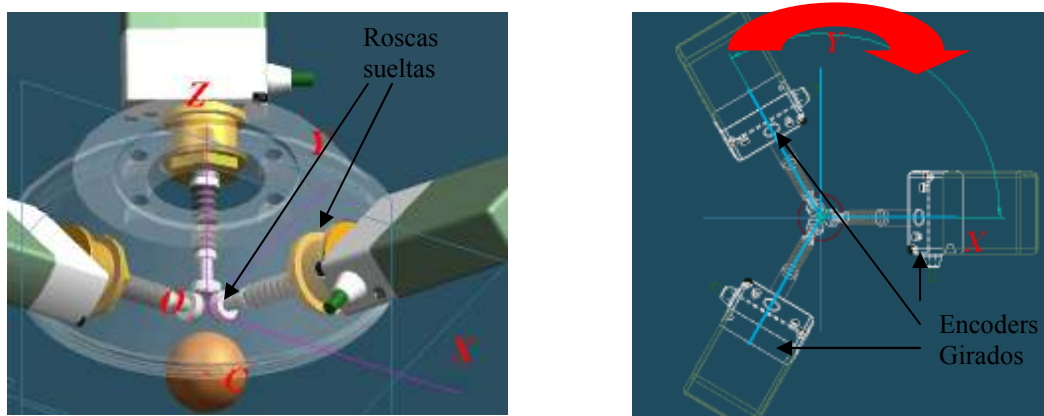


Figura 2.2-2 Causas de incoherencia en las medidas: **a)** roscas sueltas, en el ensayo se encontró suelta una de las roscas que unen la cabeza plana de los LE y la rosca que posiciona al sensor en su posición; **b)** encoders girados, en el ensayo se encontró que los encoders estaban girados 60° de su posición

Después de estas consideraciones, se toman los datos finales de las posiciones de las esferas del bloque patrón y se analiza el recorrido que hay entre la medida mayor y la menor de una misma medida. También se compara las diferencias existentes para cada una de las medidas de la posición de referencia 1B. Todo esto se hace tanto con las lecturas directas de los LEs como con la conversión ya hecha a las coordenadas XYZ del centro de la esfera en el sistema de referencia del palpador y del cubo.

Como se puede apreciar de las medidas realizadas (Fig. 2.2-6), el valor medio de las desviaciones en las lecturas tomadas es de $3,18 \mu\text{m}$, valor muy bajo y asequible ya que según los ensayos anteriores, se toman como aceptables las medidas cuyo rango de variación está por debajo de $4 \mu\text{m}$, como es el caso. También se observa que el máximo de variación es de $8,8 \mu\text{m}$ en el LE 3 de la posición 1D y que para este sensor las variaciones son mayores en todo el dominio, al igual que las de LE2 son mayores que las de LE1. Sin embargo como estamos en el rango de micras y se observa que la tendencia de todos los sensores es menor o parecida a tomar un valor de $4 \mu\text{m}$ (en el

LE3 la media supera este valor, es 4.402 μm , sin embargo al quitar los 4 valores máximos baja hasta 4,2 μm) se toman aceptables las medidas.

Posición		L1	L2	L3
1	B	8,01	6,94	6,32
1	A	7,60	6,67	6,32
1	C	7,82	6,42	6,35
1	D	8,09	6,42	6,76
1	E	7,57	6,45	6,57
1	F	7,57	6,86	6,84
1	B	8,01	6,94	6,32
2	A	8,06	7,20	6,49
2	B	8,66	7,33	6,45
2	C	8,35	6,59	6,81
2	D	8,48	6,56	7,42
2	E	7,73	6,91	7,10
2	F	7,69	7,51	7,23
1	B	8,01	6,94	6,32
3	A	7,10	6,61	5,46
3	B	7,87	6,45	5,46
3	C	7,77	5,56	5,85
3	D	7,61	5,56	6,62
3	E	6,71	5,94	6,52
3	F	6,70	6,71	6,35
1	B	8,01	6,94	6,32
4	A	8,36	8,13	6,38
4	B	9,48	7,62	6,42
4	C	9,28	6,49	7,12
4	D	8,76	6,53	8,25
4	E	7,62	7,22	8,03
4	F	7,66	8,35	7,51
1	B	8,01	6,94	6,32
5	A	5,26	5,79	6,13
5	B	5,94	7,02	4,82
5	C	6,96	6,21	4,01
5	D	8,20	4,91	4,69
5	E	7,39	4,10	5,71
5	F	6,08	4,78	6,94
1	B	8,01	6,94	6,32
6	A	7,26	8,24	8,62
6	B	8,10	9,50	7,15
6	C	9,37	8,73	6,02
6	D	10,64	7,27	6,87
6	E	9,87	6,14	8,13
6	F	8,40	6,98	9,40
1	B	8,01	6,94	6,32

Figura 2.2-3 Tabla con las lecturas directas de los LEs durante una serie

L1	L2	L3
8,0082	6,9356	6,3221
7,5992	6,6688	6,3189
7,8231	6,4171	6,3504
8,0869	6,4205	6,7649
7,5690	6,4481	6,5726
7,5673	6,8609	6,8380
8,0082	6,9355	6,3222
8,0574	7,2016	6,4851
8,6554	7,3293	6,4525
8,3510	6,5880	6,8124
8,4749	6,5565	7,4134
7,7330	6,9127	7,1014
7,6929	7,5130	7,2277
8,0083	6,9356	6,3220
7,0979	6,6067	5,4611
7,8698	6,4449	5,4578
7,7716	5,5561	5,8501
7,6050	5,5544	6,6218
6,7138	5,9412	6,5170
6,7044	6,7119	6,3510
8,0081	6,9354	6,3225
8,3584	8,1297	6,3785
9,4840	7,6203	6,4220
9,2771	6,4888	7,1208
8,7616	6,5306	8,2441
7,6240	7,2232	8,0280
7,6579	8,3441	7,5129
8,0082	6,9355	6,3222
5,2639	5,7923	6,1232
5,9367	7,0211	4,8162
6,9610	6,2069	4,0100
8,1991	4,9085	4,6929
7,3882	4,1029	5,7105
6,0753	4,7814	6,9412
8,0082	6,9354	6,3221
7,2595	8,2339	8,6178
8,0944	9,5026	7,1514
9,3654	8,7249	6,0206
10,6440	7,2684	6,8670
9,8720	6,1377	8,1305
8,3969	6,9780	9,4010
8,0082	6,9355	6,3220

Figura 2.2-4 Tabla con las medias de las lecturas directas de los LEs en las 5 series

L1	L2	L3
1,700	2,900	4,400
1,300	3,200	4,800
1,700	3,200	4,100
2,900	5,500	8,800
2,700	4,300	4,900
2,700	3,600	5,700
1,500	2,900	4,700
1,700	3,000	3,900
2,000	3,000	3,700
2,500	3,100	4,300
1,500	3,200	4,300
2,100	3,100	3,700
1,800	3,300	4,300
1,600	3,300	4,700
1,600	3,400	5,000
1,500	3,400	3,900
1,900	2,900	3,900
1,800	2,900	4,100
1,700	3,200	4,300
1,600	3,200	4,200
1,500	3,300	5,800
1,600	2,700	4,200
1,600	2,800	4,100
2,500	2,900	3,800
1,800	3,100	4,200
2,300	3,200	4,300
1,700	2,800	4,000
1,600	3,100	4,800
1,800	3,400	4,100
1,500	3,700	4,300
1,700	3,100	4,500
1,800	3,200	4,300
1,500	3,100	4,000
1,300	3,700	4,800
1,700	3,700	4,300
1,600	3,300	4,100
2,100	3,000	3,800
1,600	3,100	4,300
1,600	4,000	4,200
4,300	3,400	3,500
2,000	2,800	3,700
1,600	3,300	4,100

Figura 2.2-5 Tabla con el recorrido de las lecturas directas de los LEs en las 5 series y en micras

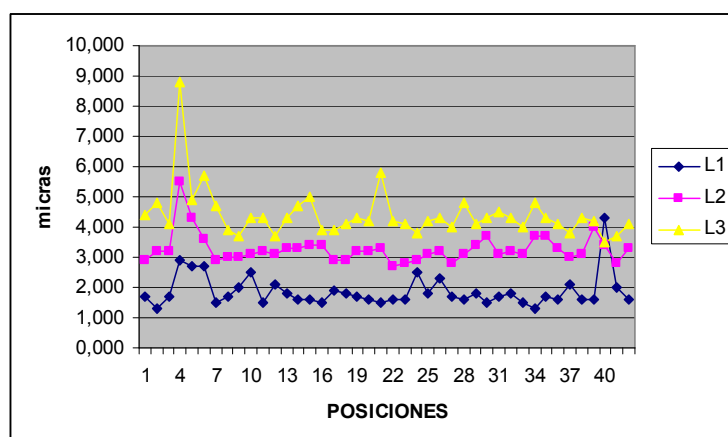


Figura 2.2-6 Gráfico representativo del recorrido de las medidas tomadas con cada sensor en cada una de las posiciones

Se hace el mismo análisis para cada una de las medidas de la posición de referencia (1B) para estudiar la tendencia que tienen las medidas a lo largo del ensayo, tomando las medidas de las cinco series como datos de un mismo proceso. En este caso se analizarán tanto las lecturas directas de los encoders, como las medidas ya transformadas de los centros de las esferas en el sistema de referencia del palpador. Sin embargo, los análisis realizados en este apartado calculan la diferencia de cada medida con la media de todas ellas, de forma que el error que se da aquí está suavizado con respecto al que se ha observado en el caso anterior, donde se daba la diferencia entre el valor máximo y mínimo. En este caso un valor alto denotará una desviación de la media y por lo tanto una fuente de error.

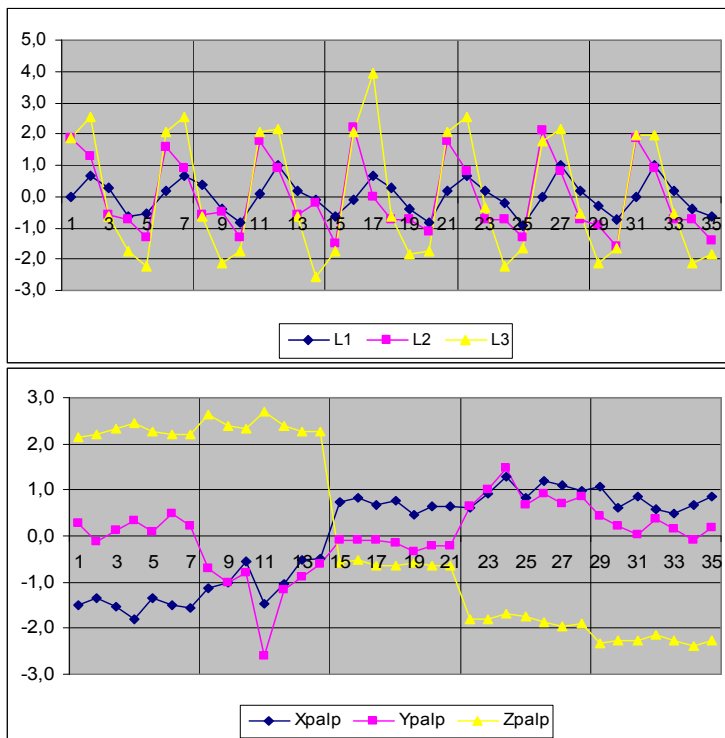


Figura 2.2-7 Análisis de los datos en la posición de referencia 1B, **a)** diferencia entre la lectura en cada punto del LEi y la media de las lecturas en todos los puntos del LEi ($i=1,2,3$); **b)** diferencia entre las cotas del centro de la esfera en SRpalpador y en cada posición con la media de esos valores en todos los puntos de palpado para cada dirección (X, Y, Z)

Como se ve en el primer gráfico, las lecturas tomadas por los sensores siguen una tendencia cíclica muy parecida entre los tres aunque cada uno de ellos con distinta amplitud, las diferencias son mayores para LE3 y menores para LE1 mientras los datos de LE2 se quedan entre los dos. Esta tendencia cíclica se sucede cada 5 posiciones, independientemente del cambio de una serie a otra de medidas (las cinco series se tomaron de forma seguida pero entre cada una de ellas se inicializaban los sensores) lo que denota que la posición alcanzada en cada una de las series es la misma pero el palpador sigue un ciclo mediante el cual se alcanza una posición más alejada o cercana a la media, una posible causa podría ser un pequeño juego en el muelle que devuelve a la punta a su posición inicial, sin embargo el estudio de este error no entra en el ámbito de este proyecto. El dato importante es que este error está comprendido entre $\pm 3\mu\text{m}$ (excepto una punta despreciable) y por lo tanto su admisión es aceptable.

En el segundo gráfico se observa que las coordenadas del centro de las esferas producen un error con el mismo patrón para cada una de ellas en los distintos puntos de

palpado al compararlas con la media (la coordenada Z tiene el mismo patrón pero con signo cambiado). Además se aprecia que estas medidas están contenidas en $\pm 2,5\mu\text{m}$, valor de nuevo asequible.

A continuación se muestra el valor medio de los errores en X, Y, Z de los distintos puntos de palpado, es decir, la diferencia entre las coordenadas X, Y, Z halladas con el palpador en el sistema de referencia del cubo y las coordenadas teóricas del cubo en esas mismas posiciones.

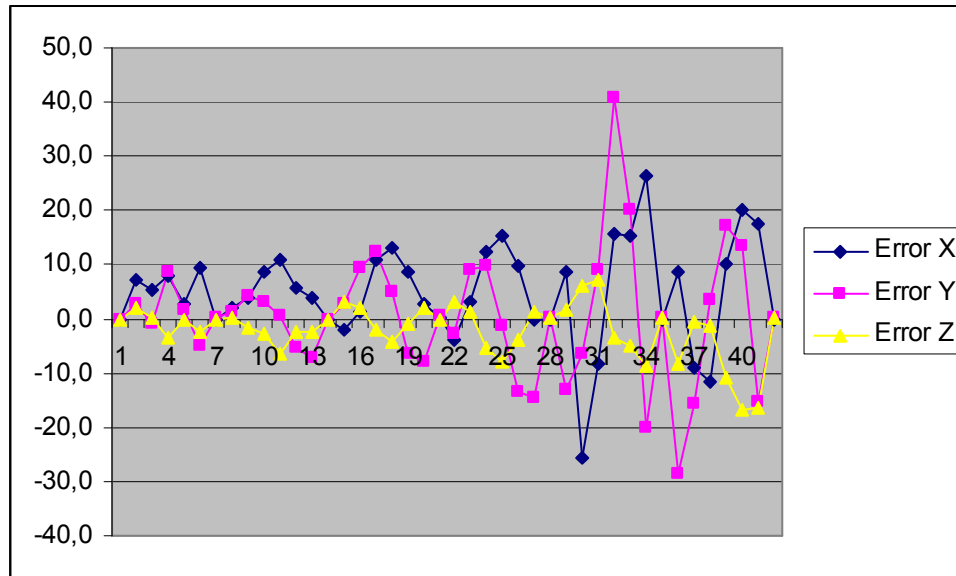


Figura 2.2-8 Errores en micras en cada uno de los puntos de palpado

Como se observa en la gráfica, los errores alcanzados son altos, alcanzando unos valores que superan los $20\mu\text{m}$, lo que evidencia diferencias entre los valores alcanzados y los nominales. Este hecho justifica y hace necesario el proceso de calibración.

Una vez se han obtenido todos estos datos, se insertan manualmente en la hoja Excel (figura 2.2-9) para que el algoritmo de mejora calcule los nuevos parámetros a introducir en el modelo para que los datos tomados sean más exactos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Parámetros	Valor Nominal	Inconformidad	Procedimiento	Medida Real	Med. Dist. Medio	SWartland	MT 12	MT 12	MT 12	X	Y	Z
2	A1[190]-Dist [Gra]	-0,37880	8,250	5	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
3	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	6	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
4	m[1] [mm]	8,080208	8,250	11	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
5	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	12	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
6	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
7	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
8	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
9	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
10	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
11	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
12	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
13	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
14	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
15	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
16	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
17	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
18	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
19	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
20	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
21	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
22	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
23	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
24	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
25	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
26	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
27	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
28	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
29	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
30	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
31	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
32	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
33	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
34	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
35	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
36	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
37	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
38	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
39	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
40	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
41	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
42	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
43	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
44	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
45	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
46	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
47	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
48	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
49	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
50	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
51	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
52	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
53	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
54	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
55	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
56	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
57	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
58	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
59	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
60	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
61	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
62	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
63	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
64	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
65	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
66	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
67	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
68	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
69	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
70	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
71	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
72	m[1] [mm]	8,080208	8,250	7	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
73	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	8	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
74	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	3	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
75	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	4	36,680808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
76	m[1] [mm]	8,080208	8,250	9	-0,220808	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
77	m[2] [mm]	-80,804380	8,250	10	-80,804380	74,260476	0	0	-0,08020	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
78	A1[190]-Dist [Gra]	-0,378808	8,250	1	-0,220808	74,260476	-0,08	-0,00708	-0,08245	-0,08020	8,08020	-0,08020	-0,08020
79	A2[250]-Dist [Gra]	36,680808	8,250	2	36,680808	74,260476	-0,0						

Durante el procesamiento de datos, el algoritmo va variando cada parámetro en un rango definido por el usuario, en este caso se usa un incremento de 0,25, es decir, para cada parámetro se busca el valor óptimo dentro del intervalo del valor del parámetro inicial $\pm 0,25$. Por esto es importante el valor inicial de los parámetros, en este caso se toman los valores de la calibración anterior, ya que estos parámetros no varían mucho con el tiempo. La figura 2.2-10 muestra los valores iniciales y los finales de estos parámetros.

	Valor inicial	Valor optimizado
A1(Y/X)-Dn1 [Gra] (α_1)	-8,970100	-9,220100
A2(Z/X)-Dn1 [Gra] (β_1)	35,608100	35,858100
m1(Y) [mm]	0,016700	-0,232883
n1(Z) [mm]	-88,534300	-88,534300
A1(X/Y)-Dn2 [Gra] (α_2)	-20,995800	-20,996217
A2(Z/Y)-Dn2 [Gra] (β_2)	36,841200	36,841200
m2(X) [mm]	-0,215100	-0,215100
n2(Z) [mm]	-88,189500	-88,189500
A1(X/Y)-Dn3 [Gra] (α_3)	39,262400	39,012400
A2(Z/Y)-Dn3 [Gra] (β_3)	-42,215200	-42,465200
m3(X) [mm]	-0,285783	-0,285783
n3(Z) [mm]	-88,940800	-88,940800
A1(Y/X)-Plan1 [Gra] (α_4)	-8,928700	-8,953700
A2(Z/X)-Plan1 [Gra] (β_4)	35,248800	35,273758
A1(X/Y)-Plan2 [Gra] (α_5)	-20,996500	-21,021500
A2(Z/Y)-Plan2 [Gra] (β_5)	36,840900	36,815900
A1(X/Y)-Plan3 [Gra] (α_6)	39,274500	39,249500
A2(Z/Y)-Plan3 [Gra] (β_6)	-42,220400	-42,245400

Figura 2.2-10 Valores iniciales de los parámetros del modelo matemático y valores optimizados

Gracias a la introducción de los parámetros optimizados en el modelo matemático, los errores cometidos a la hora de calcular los centros de las esferas se

minimizan considerablemente, lo que nos permite hacer una verificación de MH fiable y con alta resolución.

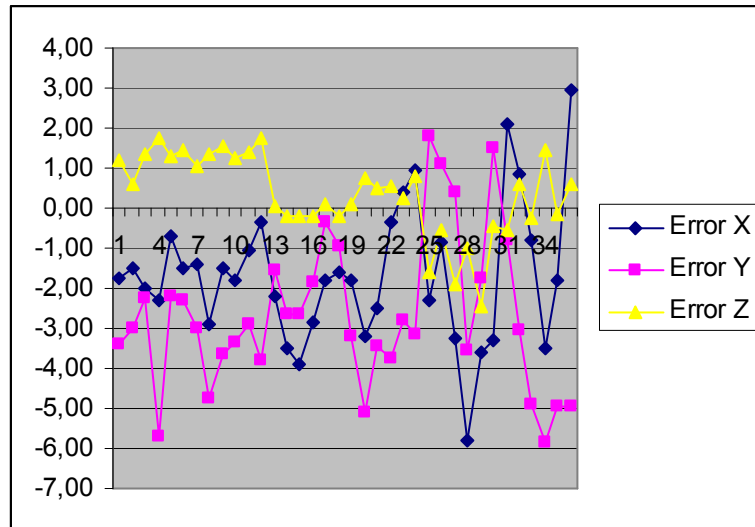


Figura 2.2-11 Errores en micras con los parámetros óptimos

Como se aprecia en el gráfico, ahora el rango de error es mucho menor si se compara con los errores obtenidos antes de la compensación (Figura 2.2-8) en donde los errores alcanzaban en muchas posiciones los 10 μm , sin embargo en el modelo optimizado son pocos los casos en los que se superan las 5 micras.

La reducción del error supera el 50% y se sitúa en torno al 60%, lo que supone un gran avance desde el punto de vista funcional, ya que nos permite el uso del palpador autocentrante como instrumento preciso. Esto demuestra el buen hacer y la utilidad que tienen los procesos de calibración y en concreto este “sencillo” algoritmo programado en Visual Basic.

Capítulo 3. Ensayo y resultados

3.1 Explicación y condiciones del ensayo

Los ensayos experimentales se han realizado en el taller del Departamento de Ingeniería de Diseño y fabricación del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza en una fresadora de control numérico (ANAYAK) de tres ejes, 1400x800x600, con un control numérico FAGOR 8024 (Fig. 3.1-1).



Figura 3.1-1 Fresadora CNC

Para los ensayos se han empleado cinco métodos directos de verificación disponibles en el departamento de la universidad, tres de ellos entran dentro de la clasificación de técnicas tradicionales mientras los otros dos se pueden definir como técnicas novedosas.

- Técnicas tradicionales:
 - Un interferómetro láser
 - Un reloj comparador electrónico o palpador inductivo utilizado junto con una regla de rectitud y una escuadra de perpendicularidad
 - Un nivel electrónico
- Técnicas novedosas:
 - Un láser-tracker
 - Un método de patrón y palpado compuesto por un artefacto (1D) y un palpador lineal directo (Barra de esferas cerámicas y palpadores autocentrantes con encoders lineales y puntas planas) pertenecientes al proyecto europeo MT-Check

El proceso de verificación de MH se controla mediante la norma española UNE 15300 [13], equivalente a la norma internacional ISO 230. En ella se especifican las técnicas de ensayo para determinar y evaluar la repetibilidad y precisión de posicionamiento de los ejes de las MH con control numérico, mediante medición directa de los ejes individuales de la máquina.

Siguiendo estas pautas, en este proyecto se ha llevado a cabo la verificación de uno de los ejes lineales de la fresadora, el eje X, midiendo los 6 grados de libertad: tres errores de traslación y tres errores de rotación, así como las desviaciones de perpendicularidad. Este proceso se ha efectuado con la máquina en vacío, es decir, sin piezas de trabajo, y en las mismas condiciones para poder así comparar los resultados obtenidos con los diferentes métodos.

Durante el ensayo se tomaron datos en dos posiciones distintas del eje Y, cómo se muestra en la figura 3.1-2 de forma que tengamos más de una serie de valores para poder así confirmar su validez. La elección de tomar medidas en dos posiciones distintas se tomó al evaluar el espacio total ensayado. Las distintas posiciones se diferencian en su coordenada Y, de forma que se evaluó la distancia total que la máquina puede recorrer en Y que es de unos 800 mm, un recorrido pequeño comparado con el posible recorrido en X: 1400 mm. Por este hecho se concluyó que la toma de datos en 2 posiciones distintas era suficiente para evaluar el comportamiento de la máquina.

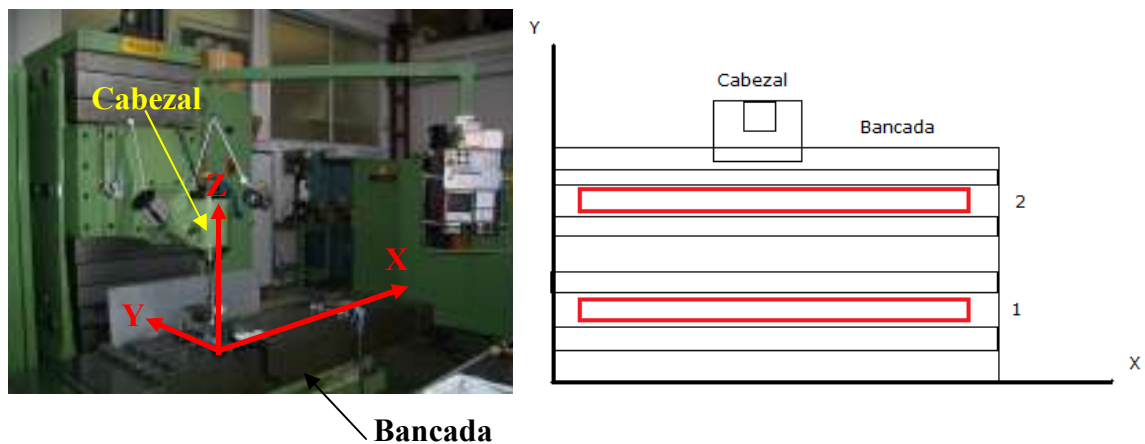


Figura 3.1-2 a) Ejes en la MH; b) Posiciones 1 y 2 en los que se toman los datos

Para cada una de estas dos posiciones, se pretende desplazar el elemento móvil a lo largo del eje a ensayar, eje X, y ubicarlo en una serie de localizaciones programadas donde se quede estacionado el tiempo suficiente para permitir la captura del valor de la posición real alcanzada. Dependiendo del ensayo realizado y las técnicas usadas en cada uno, la longitud total examinada varía, tomando datos para el interferómetro láser en un avance total de 1200 mm, 900 mm para el nivel y palpador electrónico y 700 mm para los ensayos de perpendicularidad. Esta distancia total es indiferente a la hora de comparar los ensayos ya que en la comparación se tomará los datos de los puntos coincidentes en cada ensayo.

El ciclo de ensayo seguido en la captura de datos de las posiciones programadas está normalizado y sigue las direcciones mostradas en la figura 3.1-3. Primero se miden las posiciones en sentido creciente, lo que equivale al movimiento de la bancada en el sentido +X según la figura 3.1-2 y después se miden esas mismas posiciones en sentido decreciente. Se han realizado en total cinco ciclos para cada medición, es decir, se toma la posición en cada punto 5 veces en cada sentido para cada una de las técnicas ensayadas.

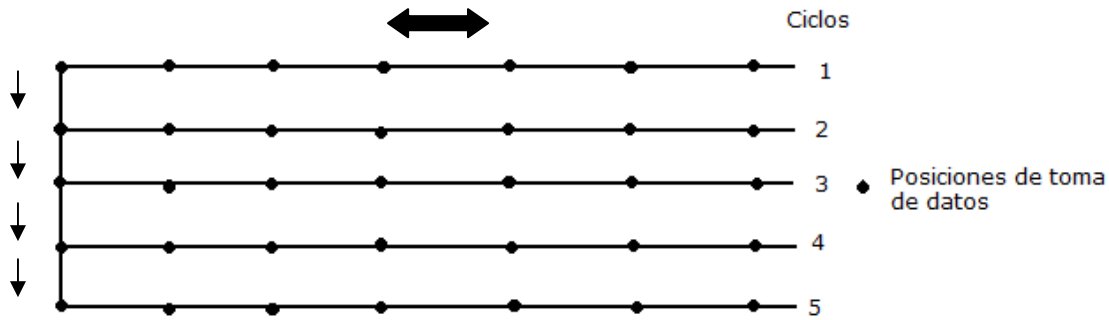


Figura 3.1-1 Esquema del programa de ensayo

En el proceso de medición, en la primera posición en sentido creciente y en la primera del sentido decreciente, se ha retrocedido en el primer caso y avanzado en el segundo 5mm en dirección del eje de movimiento, eje X, de forma que aparezca el juego del eje.

Para ensayar la máquina en condiciones de funcionamiento normal, es importante controlar el entorno térmico del ensayo. La máquina y los instrumentos deben permanecer en el ambiente del ensayo el tiempo suficiente para alcanzar una condición térmica estable antes del ensayo. Idealmente, todas las mediciones dimensionales se deberían realizar en un ambiente de ensayo con una temperatura de 20°C. Pero en condiciones de taller, las temperaturas en las que se realizan las mediciones son distintas de las condiciones normales. Esto implica que se debe controlar la temperatura del área de ensayo para después aplicar una corrección y ofrecer resultados corregidos a 20°C.

Por este motivo, en el ensayo se ha controlado la temperatura mediante la colocación de distintos dispositivos para la toma de la temperatura en la bancada, en el cabezal y si lo requería en el patrón. Se ha medido la temperatura al comienzo del ensayo, para cada una de las series realizadas y al finalizar cada una de ellas. El valor de la temperatura elegida, ha sido la media de las dos.

3.2 Interferómetro láser

El láser utilizado en el ensayo es un interferómetro láser de la marca Hewlett Packard, que está formado por un cabezal emisor de doble apertura, un juego de lentes

ópticas, un trípode y una unidad de presentación (Display) que posee un control basado en una microcomputadora que obtiene y muestra las mediciones. El láser mide la temperatura, la presión y la humedad del aire a través de sensores y compensa sus efectos mediante una unidad de compensación.

Las distintas lentes ópticas, posibilitan por medio de distintas combinaciones, la medición de errores de traslación (posición y rectitud), de rotación (rumbo y cabeceo) y de perpendicularidad entre los distintos ejes. También existe la posibilidad de estudiar la planitud de un elemento. En el Anexo 5 se explica el procedimiento y principio de medida de este aparato.



Figura 3.2-1 Ópticas para medir el error de posición xPx

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en la verificación de los errores geométricos de un eje lineal de una fresadora de control numérico con un interferómetro láser.

3.2.1 Error de posición xPx

A continuación se muestran los errores de posición obtenidos con el interferómetro láser y se analizan los resultados obtenidos para las dos posiciones en que se realizó el ensayo.

a) Posición 1

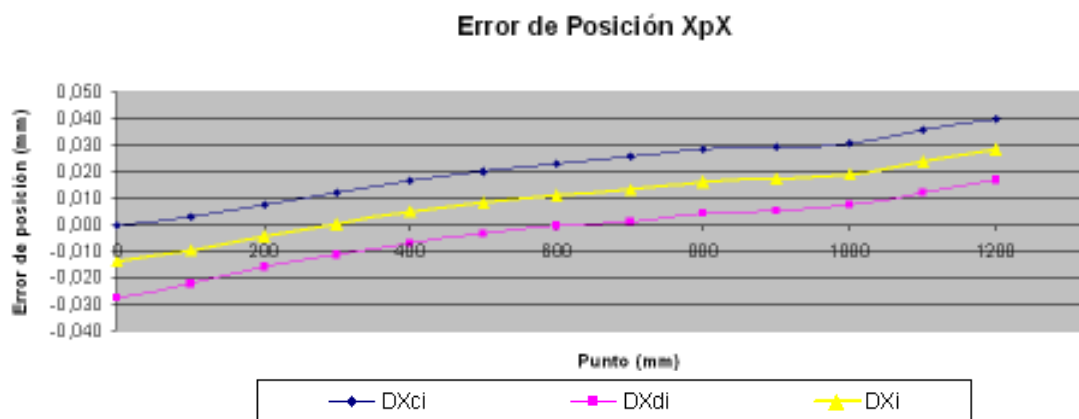


Figura 3.2.1-1 Error de posición xPx en la posición 1

De esta información se sacan los valores de repetibilidad, incertidumbre de posicionamiento y juego medio en mm:

Repetibilidad	0,011
Incertidumbre de posicionamiento	0,049
Juego medio	-0,024

Figura 3.2.1-2 Características del error de posición en la posición 1

b) Posición 2

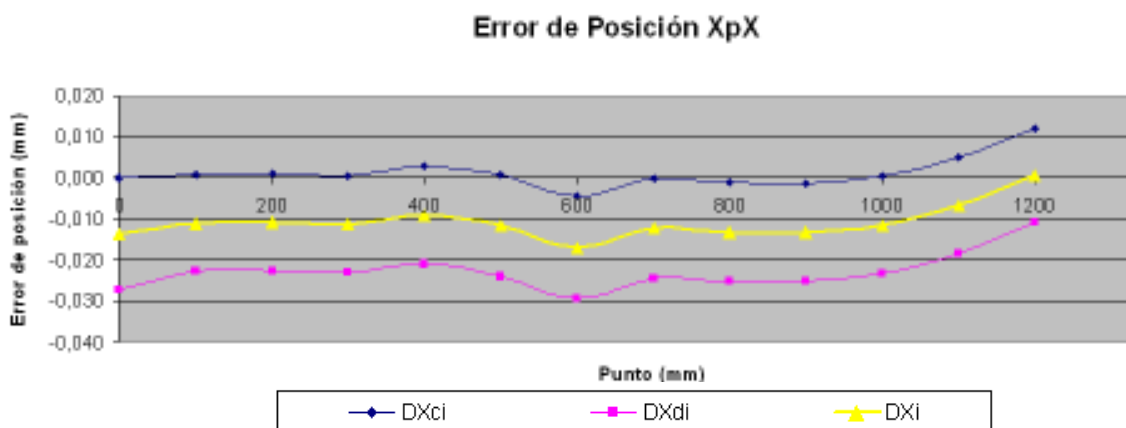


Figura 3.2.1-3 Error de posición xPx en la posición 2

La repetibilidad, incertidumbre y juego de esta segunda medida se detallan a continuación (en mm):

Repetibilidad	0,005
Incertidumbre de posicionamiento	0,021
Juego medio	-0,024

Figura 3.2.1-4 Características del error de posición en la posición 2

c) Comparación

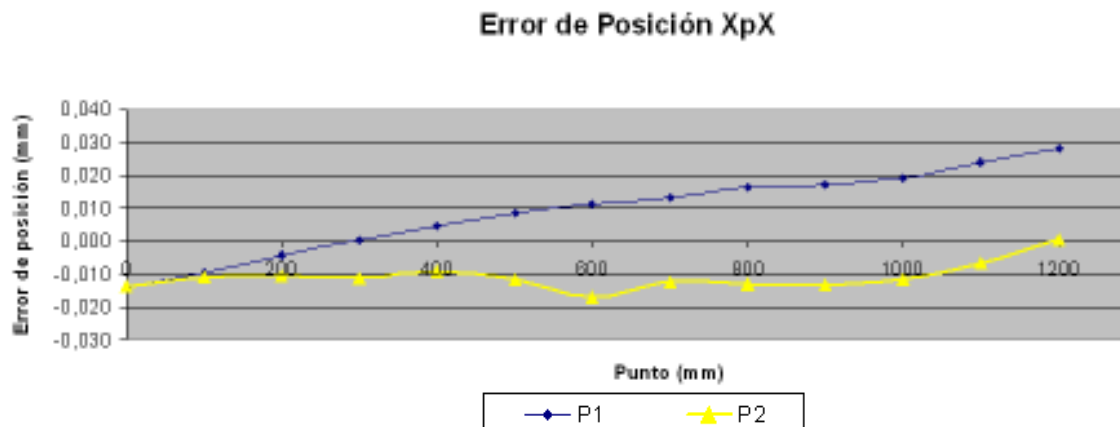


Figura 3.2.1-5 Error de posición xPx medido con el interferómetro láser

En esta gráfica se observa como el error medido en la posición 1 tiene una tendencia distinta a la mostrada en la posición 2, aunque fijándose más detalladamente, entre el punto X=700 y X=1000, donde se aprecia un ligero valle en la posición 2, parece amortiguarse la tendencia ascendente en la posición 1. Esta diferencia puede deberse a que en la posición 1 se colocó el reflector a una altura superior que la colocada en la posición 2 (en la posición 2 la altura era de unos 10 cm respecto a la mesa, mientras que en la posición 1 esta altura se aumentaba hasta 17,5 cm), multiplicando los efectos de los errores angulares y aumentando el efecto ABBE al alejarnos del eje de movimiento. Además de esta causa, también se debe considerar el

efecto del error de rumbo (Apartado 3.2.5), pues al estar las trayectorias separadas en el eje Y, el giro indeseado que se genera en Z provoca una alteración de la coordenada X del punto en función de la coordenada Y en que nos encontremos.

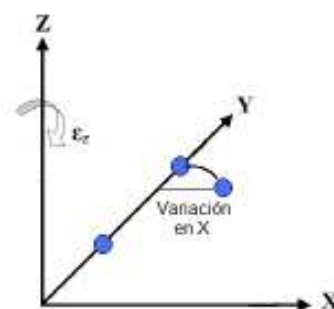


Figura 3.2.1-6 Efecto del error de rumbo sobre la coordenada X

Para comprobar este hecho se observa el efecto que tendrían los errores de cabeceo y rumbo medidos para esta máquina en la posición 1 y calculado para una altura de 7,5 cm (diferencia de alturas entre las dos posiciones) y una diferencia en la coordenada Y de 500 mm (distancia existente entre las dos trayectorias medidas).

Diferencia xPx (μm)	Desv. cabeceo	Desv. rumbo	Desv. total
-0,224	0	0,000	0,000
1,437	-4,857	1,437	-3,420
6,369	-8,83	2,991	-5,839
11,628	-6,014	6,417	0,403
13,718	-2,38	9,814	7,434
19,94	0,396	11,746	12,142
28,2	3,747	12,179	15,926
25,714	6,511	13,089	19,600
29,405	10,593	11,862	22,455
30,339	13,529	11,734	25,263
30,55	15,476	12,192	27,668
30,578	15,535	12,111	27,646
27,711	15,127	9,483	24,610

En la primera columna se muestran las diferencias obtenidas entre el error de posición tomado en uno y otro lugar de la máquina. La segunda y tercera columna muestran la desviación que se genera debido a haber medido uno y otro error a una diferencia de altura de 7,5 cm y en una posición Y separada 500 mm, la tercera es la suma de estos dos. Se observa como a partir de la cuarta posición hay una tendencia creciente en el error xPx y la desviación total, separadas un valor medio de 6 μm y con un comportamiento muy similar (Fig.

Figura 3.2.1-7 Efectos del error de cabeceo y de rumbo sobre el error de posición

3.2.1-8). Por lo tanto la diferencia existente en el error de posición entre una y otra posición esta debida en gran parte al comportamiento propio de la máquina y al error ABBE incorporado al elevar el punto de toma de datos. Lo que evidencia comportamientos distintos de la máquina en diferentes puntos.

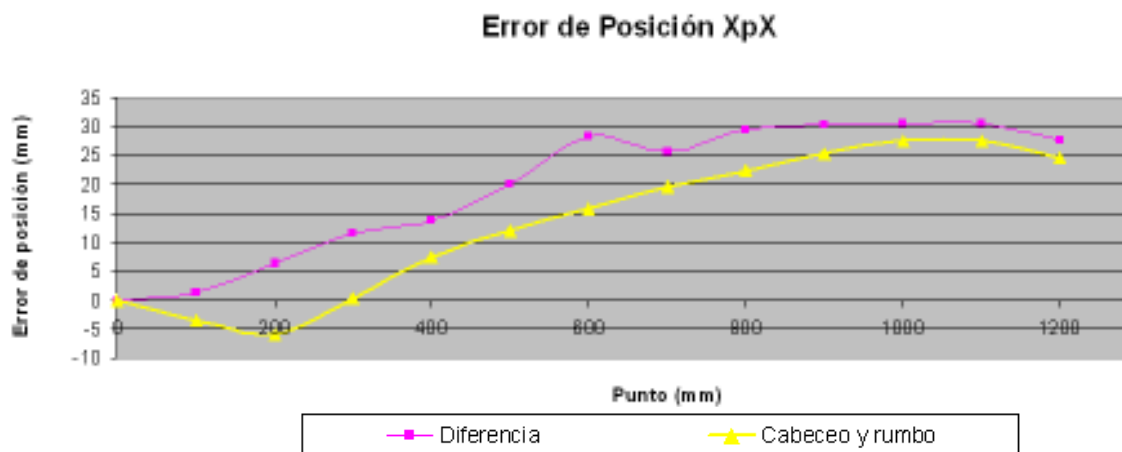


Figura 3.2.1-8 Comparación entre la diferencia de error obtenida en las dos posiciones y la diferencia causada por el error de cabeceo y rumbo al situarse en distinta posición

3.2.2 Error de rectitud xTy

a) Posición 1

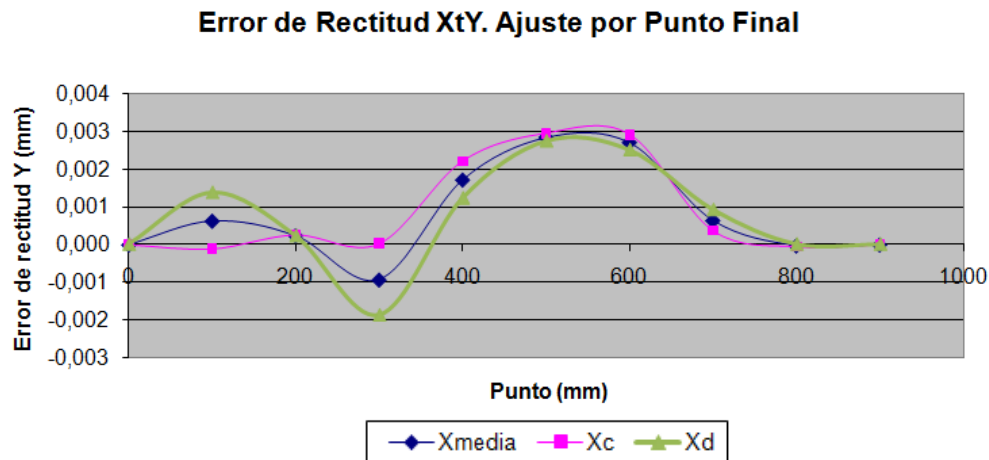


Figura 3.2.2-1 Error de rectitud XtY en la posición 1 con ajuste por Punto Final

En este método, la trayectoria seguida por la máquina se calcula uniendo el punto inicial y el final mediante una recta, sobre la que se calculará el error. En este caso la recta calculada viene dada por la función:

Pendiente del recorrido de MH resp. al eje óptico m	-0,001	$Y = -0,01X - 0,01$
b (mm)	-0,001	

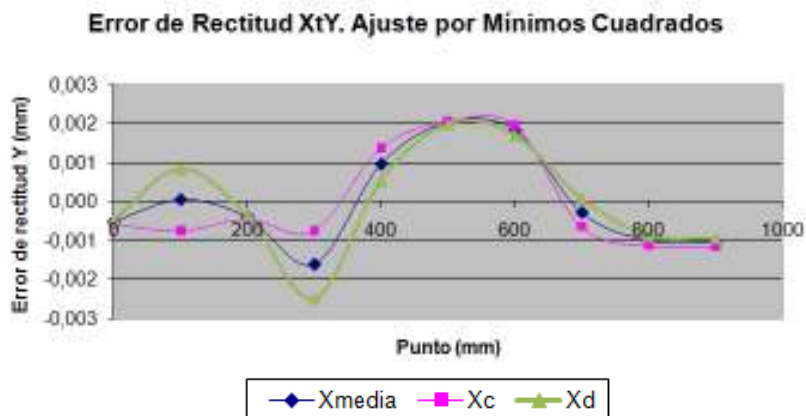


Figura 3.2.2-2 Error de rectitud XtY en la posición 1 con ajuste por Mínimos cuadrados

En donde la ecuación de la recta de aproximación es:

Pendiente del recorrido de MH resp. al eje óptico m	-0,00073	$Y = -0,00073X - 0$
b (mm)	0,0000	

El rango entre series (creciente y decreciente) tiene un máximo de 2 μm tanto para el primer ajuste como para el segundo, y se observa como en los dos métodos se

sigue la misma tendencia ofreciendo unos valores muy similares en cada punto. La figura 3.2.2-3 representa los resultados obtenidos para los dos métodos y se observa cómo se obtienen valores muy parecidos diferenciados como máximo en 1 μm

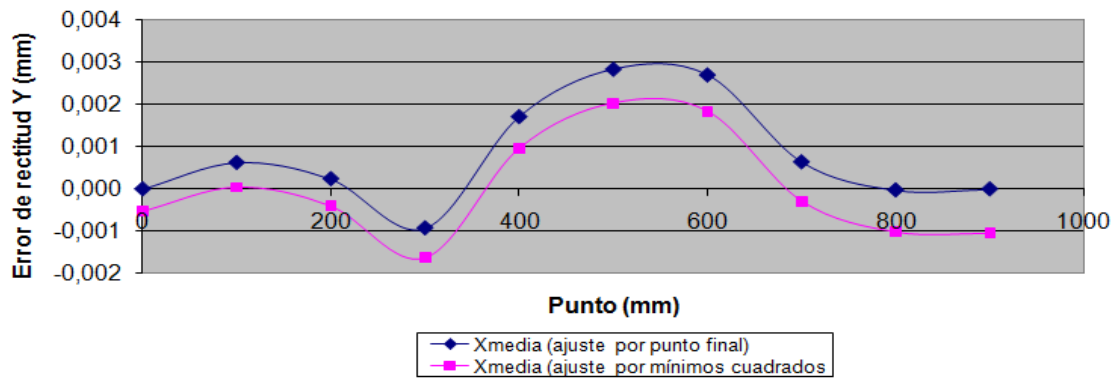


Figura 3.2.2-3 Comparación del resultado obtenido con ambos métodos de ajuste

b) Posición 2

Al igual que con la posición 1 se ofrecen las mismas gráficas, observando unas tendencias parecidas, aunque más acusadas, en el comportamiento de la máquina respecto a los errores cometidos por la misma. Esto provoca que la diferencia entre métodos sea mayor pero no excesiva pues tiene un valor medio de 3 μm .

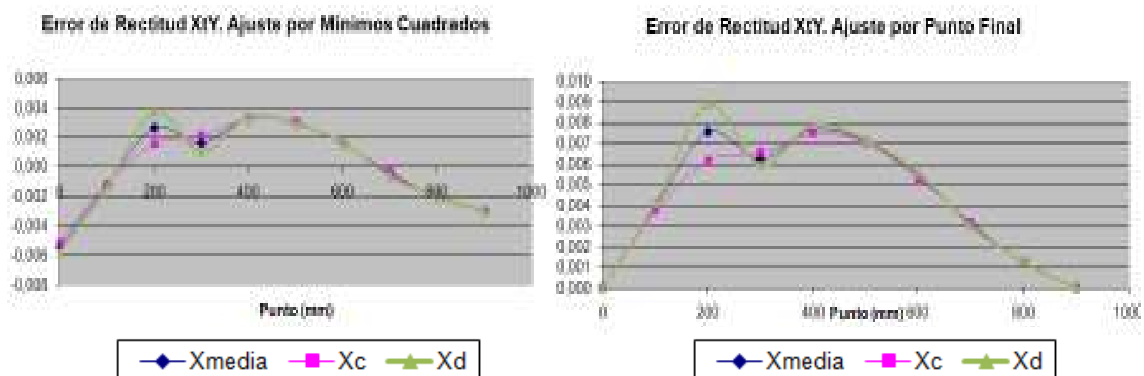


Figura 3.2.2-4 Resultado obtenido con ambos métodos de ajuste

Según los resultados obtenidos y a la vista de la poca diferencia entre los resultados, a partir de ahora se tomarán los errores de rectitud calculados por el ajuste de mínimos cuadrados, pues la recta de referencia calculada de este modo toma en cuenta todos los puntos que entran en el análisis y se ajusta más al modelo real.

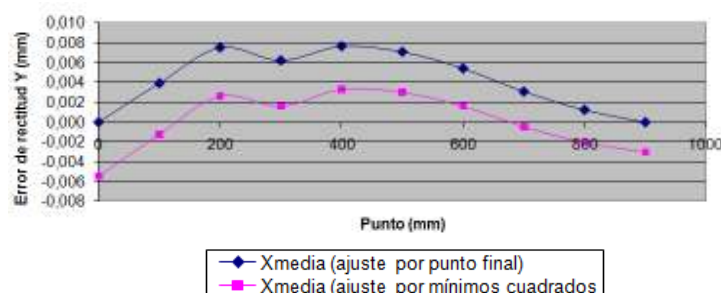


Figura 3.2.2-5 Comparación del resultado obtenido con ambos métodos de ajuste

c) Comparación

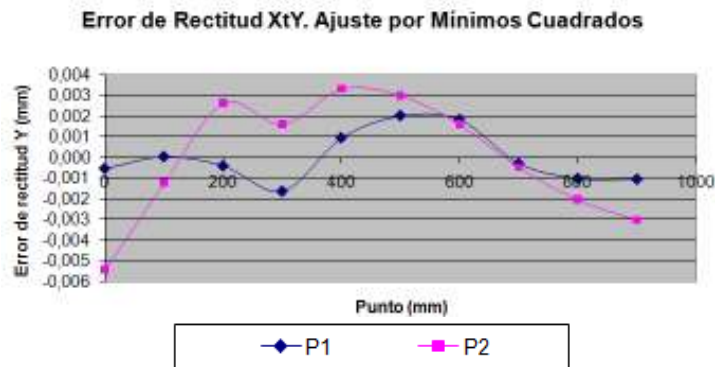


Figura 3.2.2-6 Error de rectitud xTy medido con el interferómetro láser

En la gráfica, se aprecia diferencia en la magnitud del error medido pero la tendencia seguida por ambas líneas es muy parecida, teniendo un máximo de separación en el punto inicial de 5 μm pero disminuyendo en los puntos sucesivos, finalizando con una separación media de 2 μm .

3.2.3 Error de rectitud xTz

a) Posición 1 y 2

En este caso, la representación para los datos en la posición 1 y 2 es muy parecida. En ambas se observa que el rango entre series (crecientes y decrecientes) tiene una media de 1 μm y su desviación típica es de 1 μm . En ambas series se observa como el error asciende linealmente hasta $X=300$ mm donde tiene un máximo a partir del cual empieza a disminuir progresivamente.

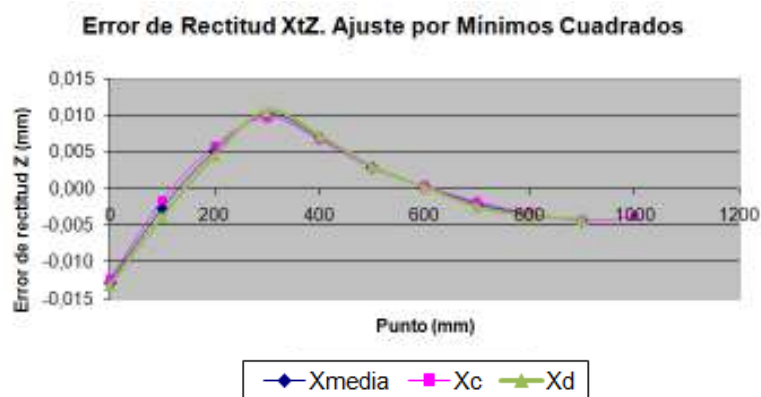


Figura 3.2.3-1 Error de rectitud XtZ en la posición 1 con ajuste por Mínimos cuadrados

b) Comparación

Se muestra una tendencia muy parecida con una diferencia máxima de 2,5 μm pero con una diferencia media de 1 μm .

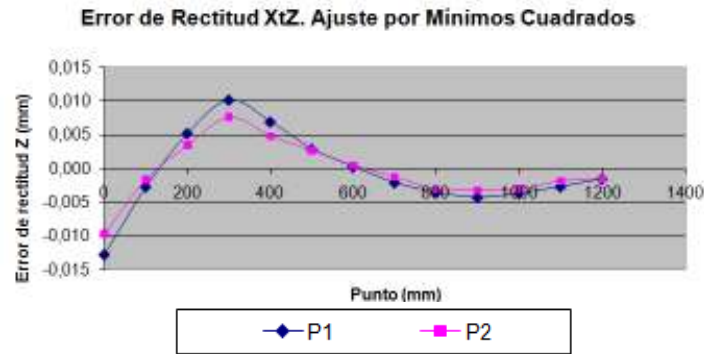


Figura 3.2.3-2 Error de rectitud xTz medido con el interferómetro láser

3.2.4 Error de cabeceo xRy

a) Posición 1 y 2

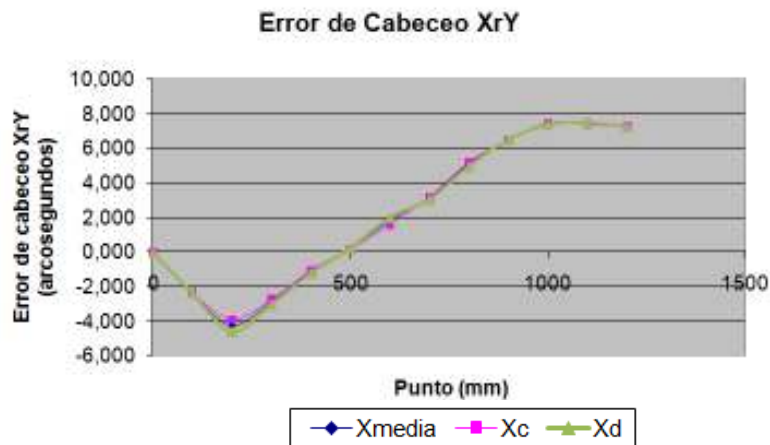


Figura 3.2.4-1 Error de cabeceo xRy en la posición 1

En estas mediciones se observa un rango de variación entre series de 0,5 arcosegundos ($\approx 2,5\mu\text{m/m}$) con una desviación típica de 0,2 arcosegundos ($\approx 1\mu\text{m/m}$). Además se aprecia de nuevo un cambio significativo en la posición $X=300$ mm, donde se pasa de tener un error negativo con tendencia descendente a una tendencia ascendente.

b) Comparación

Se observa como las trayectorias en las dos posiciones son muy parecidas, casi idénticas, y están separadas por unos 3 arcosegundos. Su tendencia es casi lineal y se observa como a partir del punto 200/300 la trayectoria cambia de decreciente a creciente. Se observa el mismo comportamiento con el nivel, con el que también se mide el error de cabeceo, lo que presupone algún cambio geométrico en la máquina, probablemente desgaste de algún diente en el sistema de accionamiento.

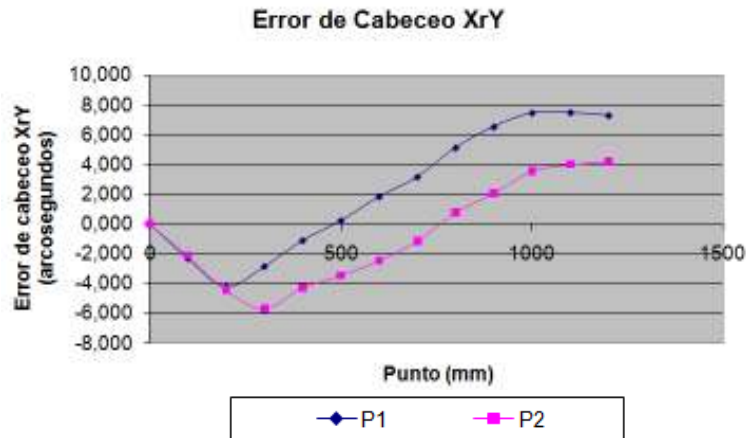


Figura 3.2.4-2 Error de cabeceo xRy medido con el interferómetro láser

3.2.5 Error de rumbo xRz

a) Posición 1 y 2

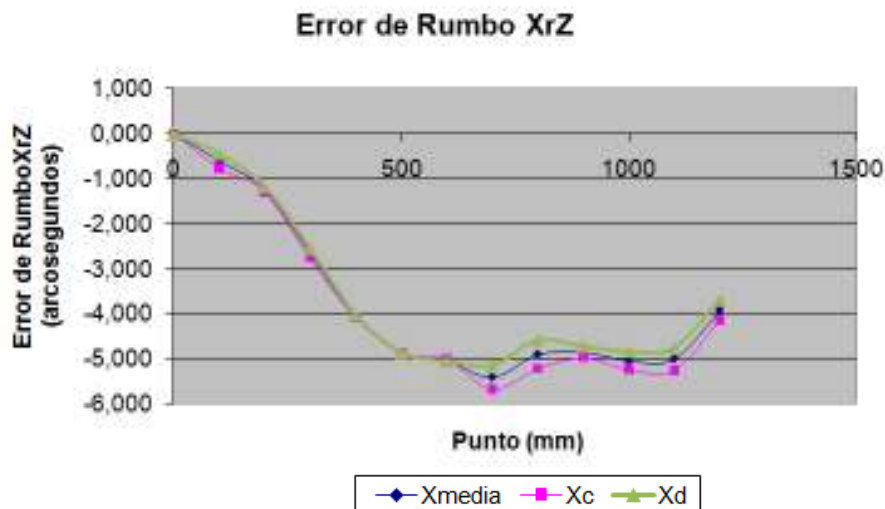


Figura 3.2.5-1 Error de rumbo XrZ en la posición 1

El rango máximo obtenido entre series es de 0,5 arcosegundos ($\approx 2,5\mu\text{m/m}$) con una desviación típica de 0,2 arcosegundos ($\approx 1\mu\text{m/m}$). La tendencia que sigue es descendente hasta el punto $X=500$ mm donde parece se estabiliza y pretende volver a ascender, aunque para conocer esta tendencia, es preciso ensayar en un rango mayor.

b) Comparación

La gráfica muestra una tendencia muy similar en ambas posiciones, apareciendo una diferencia máxima de $1,5\mu\text{m}$ en el último punto, que puede deberse a un fallo puntual en la medición o a que la tendencia del error en ambas posiciones varía a partir de esta cota. Sin embargo la tendencia general muestra un promedio en la diferencia menor que $0,25\mu\text{m}$ con una desviación típica un poco superior a $0,5\mu\text{m}$.

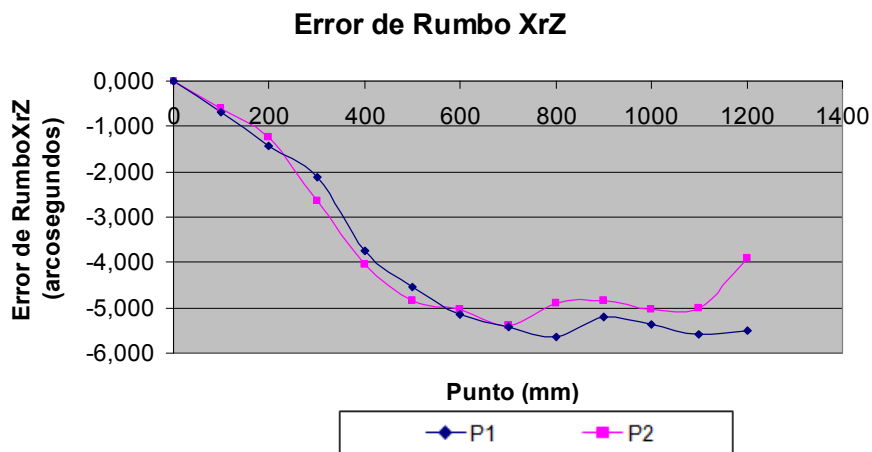


Figura 3.2.5-2 Error de rumbo XrZ en la posición 1 y 2

3.2.6 Error de perpendicularidad xWy

El ensayo de error de perpendicularidad consiste en la obtención de dos errores de rectitud, perpendiculares una con otra, realizadas con un reflector de rectitud fijo y por lo tanto inmóvil en el cambio de medida de una rectitud a otra. Por este hecho, se realiza la medida en este caso en una única posición central de la máquina.

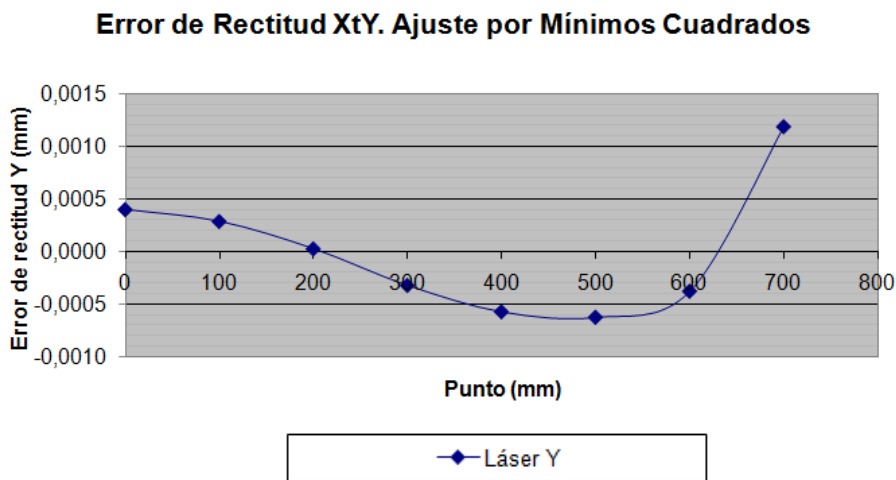


Figura 3.2.6-1 Error de rectitud xTy

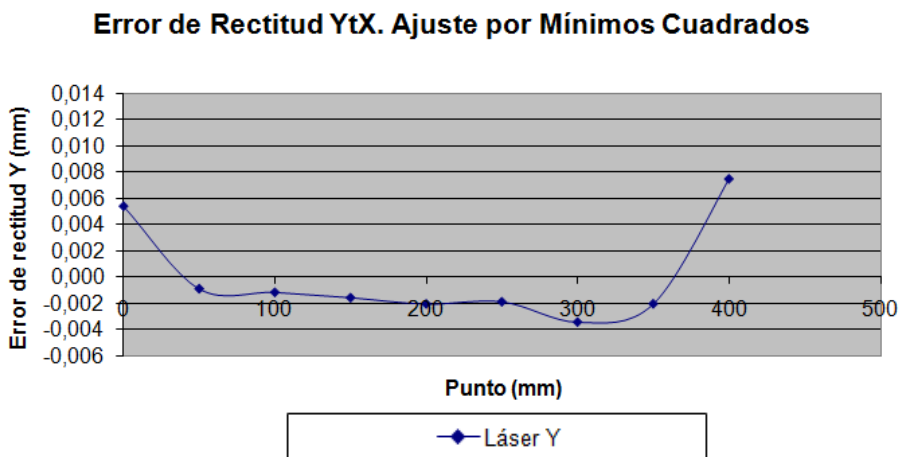


Figura 3.2.6-2 Error de rectitud yTx

Para calcular ahora el error de perpendicularidad, se necesita conocer la diferencia de ángulo de las rectas que aproximan el error de rectitud xTy e yTx, como muestra la figura 3.3.6-3. Pasamos pues a medir la pendiente de las rectas de aproximación de cada uno de los errores.

	Rectitud XtY		Rectitud YtX	
Pendiente del recorrido de MH resp. al eje óptico m	-0,00348	$Y = -0,00348X + 0,0007$	0,00363	$Y = 0,00363X - 0,0125$
b (mm)	0,0007		-0,0125	

Figura 3.2.6-3 Ecuaciones de las rectas en los errores de rectitud para medir el error de perpendicularidad

Teniendo en cuenta que el error de perpendicularidad de la escuadra óptica es de 0,23 arcosegundos, y que este error debe sumarse a la diferencia de las rectitudes, y que la pendiente de las rectas antes calculadas son las tangentes de los ángulos que forman con el eje X y con el eje Y respectivamente, se tiene que el error de perpendicularidad de la fresadora en el plano XY es:

$$xWy = \phi_{xy} - \phi_{yx} + 0,23 = 31,17 \text{ arcosegundos } (\approx 151,11 \mu\text{m/m})$$

3.2.7 Error de perpendicularidad xWz

En las siguientes gráficas se muestran los errores medidos para las rectitudes en X y en Z calculadas por el método de mínimos cuadrados.



Figura 3.2.7-1 Error de rectitud xTz

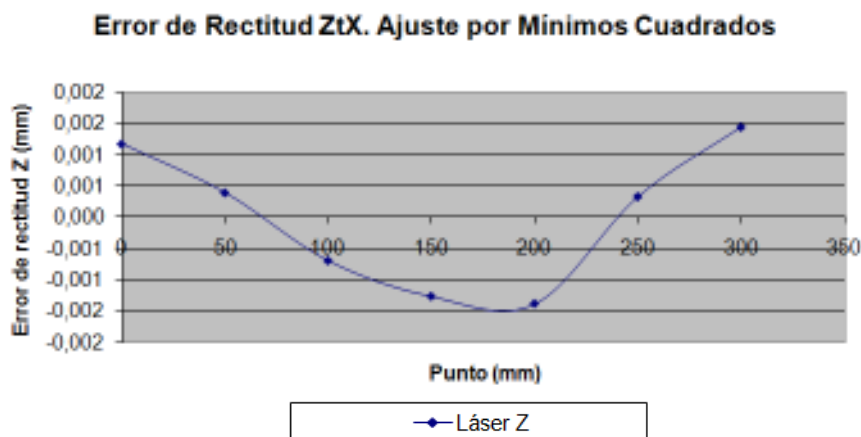


Figura 3.2.7-2 Error de rectitud zTx

Para calcular el error final de perpendicularidad se tienen en cuenta las mismas consideraciones que en el ensayo anterior:

	Rectitud XtZ		Rectitud ZtX	
Pendiente del recorrido de MH resp. al eje óptico m	0,00081	$Y = 0,00081X + 0,00107$	0,00078	$Y = 0,00078X - 0,0075$
b (mm)	0,00107		-0,0075	

Figura 3.2.7-3 Ecuaciones de las rectas en los errores de rectitud para medir el error de perpendicularidad

Añadiendo al igual que antes el error de la escuadra óptica (0,23 arcosegundos) al resultado obtenido, se tiene:

$$xWz = \varphi_{xz} - \varphi_{zx} + 0,23 = 6,42 \text{ arcosegundos } (\approx 31,11 \mu\text{m/m})$$

3.3 Nivel electrónico

El nivel utilizado en el ensayo es un nivel electrónico de la marca Wyler con el que se ha medido experimentalmente el error de cabeceo en el eje X (xRy) y el error de vuelco en ese mismo eje (xRx).

Este aparato proporciona medidas angulares gracias a un sistema capacitivo interno mediante el que se transmite una señal que muestra la medida tomada en un display. En el Anexo 5 se explica el procedimiento y principio de medida de este aparato más detalladamente.



Figura 3.3-1 Medida del error de cabeceo XrY

3.3.1 Error de cabeceo xRy

Convirtiendo los resultados obtenidos en unidades de ángulo, en la siguiente gráfica se representa el error de cabeceo para la medición de los sentidos creciente (Xc), decreciente (Xd) y la media de ambos.

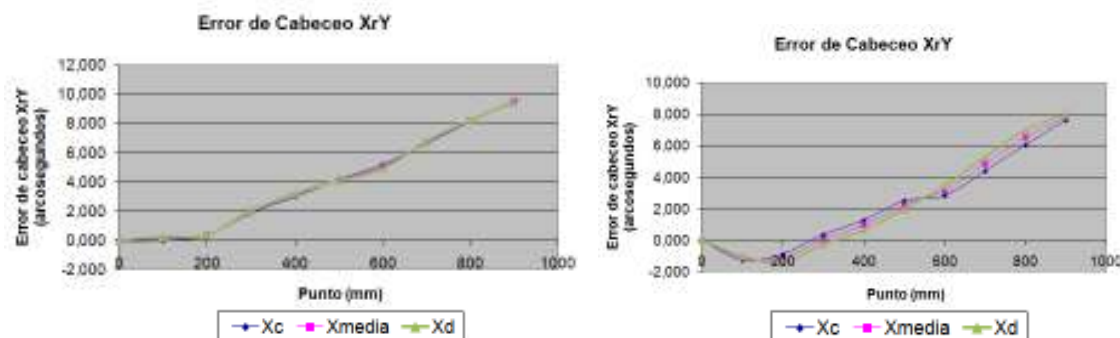


Figura 3.3.1-1 Error de cabeceo XrY a) en la posición 1; b) en la posición 2

En las gráficas se observa como siguen una tendencia parecida, creciente en los dos casos y aproximado a un comportamiento lineal. En los resultados obtenidos en la

posición 2 la variación es algo mayor, teniendo una diferencia entre series con un máximo de 0,9 arcosegundos ($\approx 4\mu\text{m/m}$) y una desviación típica de 0,6 arcosegundos ($\approx 3\mu\text{m/m}$). Por otro lado en la posición 1 se consigue un rango entre series de 0,2 arcosegundos ($\approx 1\mu\text{m/m}$) con una desviación típica de 0,2 arcosegundos ($\approx 1\mu\text{m/m}$).

3.3.2 Error de vuelco xRx

Convirtiendo de nuevo los resultados a medidas de ángulo, en la siguiente gráfica se representa el error de vuelco para la medida de los sentidos creciente (X_c), decreciente (X_d) y la media de ambos.

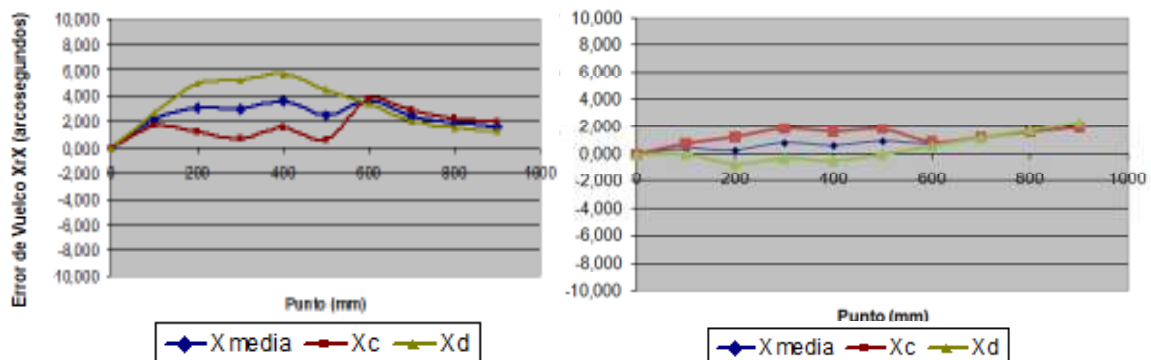


Figura 3.3.2-1 Error de vuelco XrX: **a)** en la posición de la izquierda; **b)** en la posición de la derecha

En la gráfica se observa que se sigue una trayectoria con muy poca pendiente pero que a partir del punto $X=600$ toma una tendencia algo diferente, en la izquierda descendente y en la derecha ascendente. Además que se aprecia un rango entre series de 2 arcosegundos ($\approx 10\mu\text{m/m}$) con una desviación típica de 1 arcosegundo ($\approx 5\mu\text{m/m}$) para la posición de la derecha y algo mayor en la izquierda: diferencia de 2 arcosegundos ($\approx 10\mu\text{m/m}$) y desviación típica de 1,8 ($\approx 9\mu\text{m/m}$), lo que es algo superior a lo conseguido en los errores anteriores, pero tampoco es excesivo.

3.4 Reloj comparador electrónico

En este ensayo se han medido experimentalmente los errores de rectitud del eje X (xTy y xTz) gracias a una regla de rectitud así como el error de perpendicularidad entre los ejes X e Y (xWy), en este caso utilizando una escuadra de perpendicularidad.

Este aparato, consta de una punta de palpado que transmite los movimientos captados durante la traslación a lo largo del elemento patrón (regla o escuadra) a un equipo electrónico que los muestra. Su procedimiento y principio de medida se detalla en el Anexo 5.



Figura 3.4-1 Medida del error de perpendicularidad xWy

3.4.1 Error de rectitud xTy

A continuación se representa el error de rectitud calculado a partir de los datos obtenidos en la posición 1 y 2. En la gráfica aparecen los errores en la serie creciente (X_c), en la decreciente (X_d) y la media de las dos.

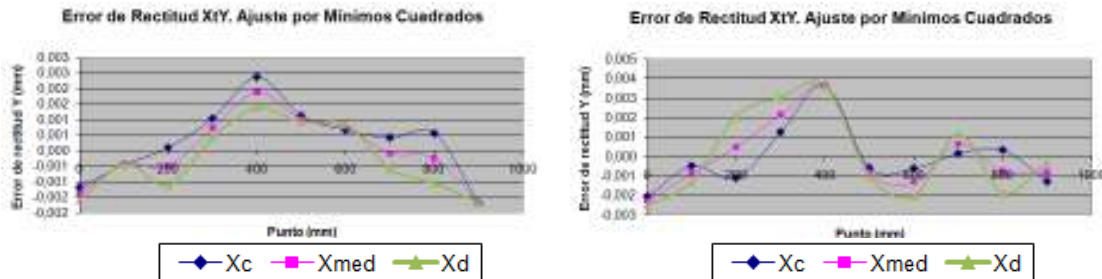


Figura 3.4.1-1 Error de rectitud (XtY): a) en la posición 1; b) posición 2

Como se observa, la tendencia seguida es parecida, marcando un máximo en el punto $X = 400$ mm y otro pico entorno a los puntos $X = 700/800$ mm. En ella se observa como en la posición 1 se tiene un rango menor, de $2 \mu\text{m}$ entre series ascendente y descendente con una desviación típica de $1 \mu\text{m}$.

3.4.2 Error de rectitud xTz

A continuación se muestran los datos obtenidos en la posición 1 y 2, en la gráfica aparecen los errores en la serie creciente (X_c), en la decreciente (X_d) y la media de las dos.

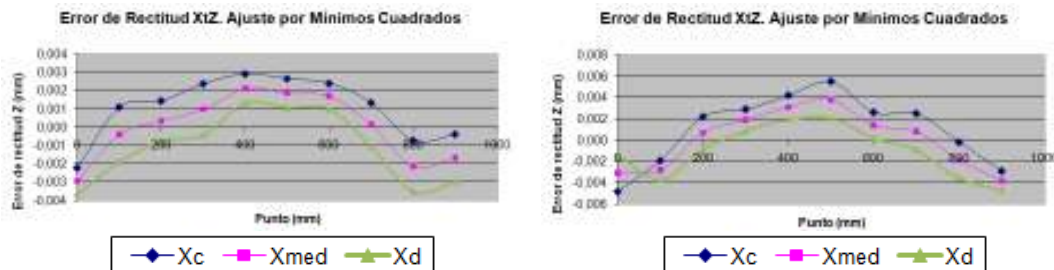


Figura 3.4.2-1 Error de rectitud (XtZ): a) en la posición 1; b) posición 2

En ambas gráficas se nota la misma tendencia marcando un máximo en $X = 400$ mm para la posición 1 y $X = 500$ mm para la posición 2. En ambas se establece un rango de diferencia entre series ascendentes y descendentes de $3 \mu\text{m}$ con una desviación típica de $2 \mu\text{m}$.

3.4.3 Error de perpendicularidad xWy.

Las siguientes gráficas muestran los errores de rectitud calculados en el ensayo para la obtención del error de perpendicularidad.

A partir de estos datos se sacan las rectas representativas de cada una de las trayectorias seguidas durante el ensayo (Fig. 3.4.3-3)

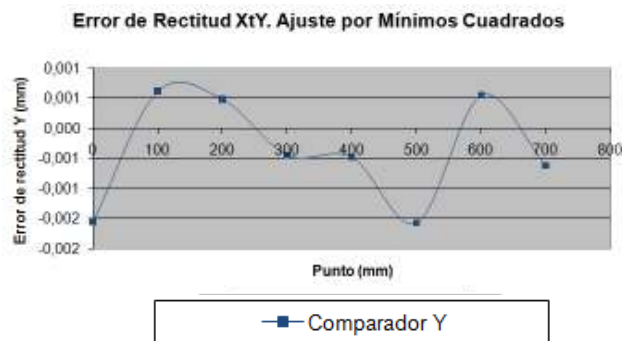


Figura 3.4.3-1 Error de rectitud xTy

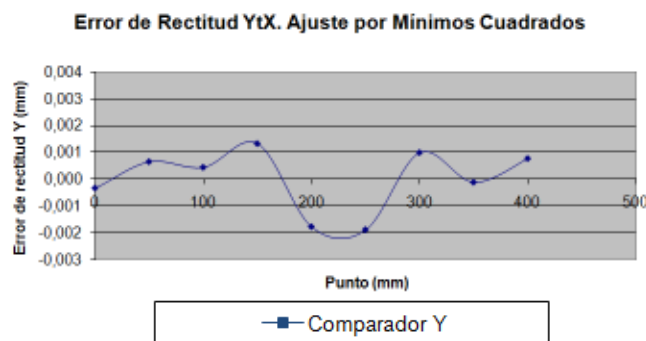


Figura 3.4.3-2 Error de rectitud yTx

	Rectitud XtY		Rectitud YtX	
Pendiente del recorrido de MH resp. al eje óptico m	-0,0035	$Y = -0,0035X - 0,00005$	0,0038	$Y = 0,0038X - 0,0037$
b (mm)	-0,00005		-0,0037	

Figura 3.4.3-3 Ecuaciones de las rectas en los errores de rectitud para medir el error de perpendicularidad

Teniendo en cuenta que el error de perpendicularidad de la escuadra de perpendicularidad es de 1,031 arcosegundos, y que este error debe sumarse a la diferencia de las rectitudes, y que la pendiente de las rectas antes calculadas son las tangentes de los ángulos que forman con el eje X y con el eje Y respectivamente, se tiene que el error de perpendicularidad de la fresadora en el plano XY es:

$$xWy = \varphi_{xy} - \varphi_{yx} + 1,031 = 62,91 \text{ arcosegundos } (\approx 305 \text{ } \mu\text{m/m})$$

3.5 Láser-tracker

El aparato usado durante el ensayo ha sido el modelo LT(D) 600, un láser-tracker de Leica, cuyas características son:

RANGO DE MEDIDA	VELOCIDAD LATERAL	PRECISIÓN
<ul style="list-style-type: none"> Horizontal: $\pm 235^\circ$ Vertical: $\pm 45^\circ$ Distancia: 40 m 	4 m/s	<ul style="list-style-type: none"> Angular: $0.14''$ Radial: $1.26 \text{ } \mu\text{m}$

Figura 3.5-1 Especificaciones del láser-tracker LT(D) 600 [23]

Para el cálculo de los errores, se utiliza una metodología para el tratamiento de los datos basada en el principio de multilateración [15][16] de forma que se calculen los errores mediante la traslación de todos los datos obtenidos en tres posiciones diferentes a un único sistema de referencia donde se opera. Para ello se procedió a medir las posiciones alcanzadas por la máquina, siguiendo las mismas trayectorias, desde tres posiciones distintas en la que se colocó al láser-tracker (Fig. 3.5-1 a). Gracias a esto se consigue la posición de múltiples puntos desde distintos sistemas de referencia pues en cada trayectoria seguida se mide en tres posiciones de la mesa (Fig. 3.5-1 b) y se toman datos cada 10 mm de avance, permitiendo aplicar una traslación del sistema de referencia mediante matrices de transformación. Estas matrices se calculan con un proceso iterativo cuyos datos iniciales son las propias coordenadas obtenidas, pues se impone que el mismo punto medido desde diferentes posiciones debe tener las mismas coordenadas al trasladarlo a un sistema de referencia común (lo que es obvio). El procedimiento seguido y los cálculos realizados se detallan en el Anexo 5.

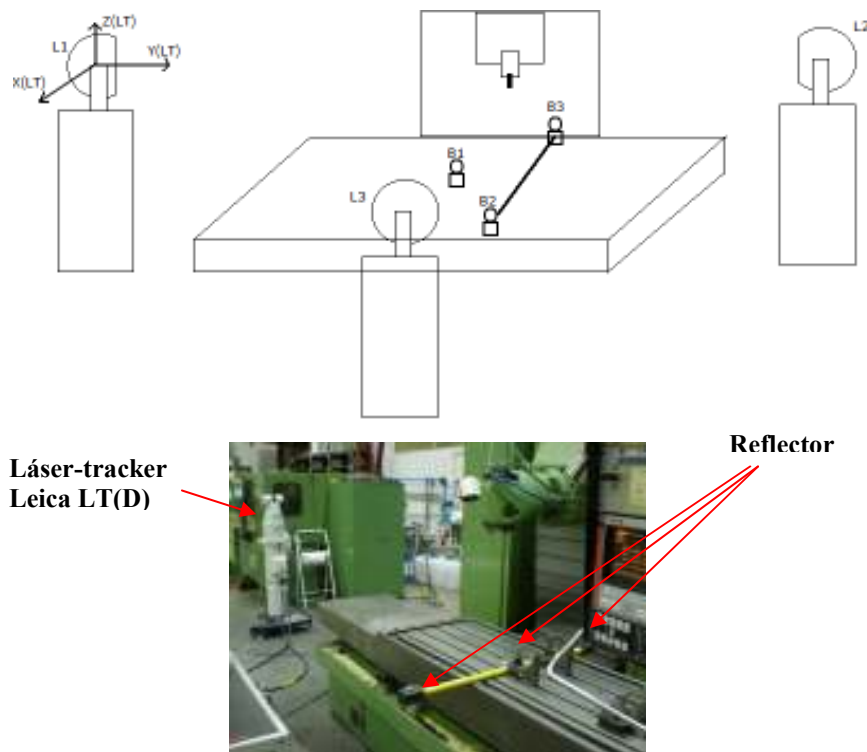


Figura 3.5-1 a) Posición de los láser-tracker durante el ensayo; b) Posición de toma de datos (reflectores)

3.5.1 Error de posición xPx

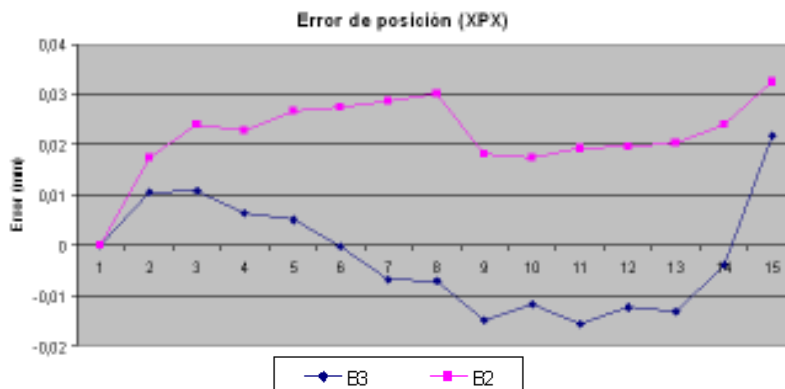


Figura 3.5.1-1
Error de posición
xPx (en mm)

En esta gráfica se observa como el error medido en la posición B2 tiene una tendencia distinta a la mostrada en la posición B3, al igual que sucedía en el cálculo del error de posición con el interferómetro láser. En este caso, la diferencia se debe en gran parte al error de rumbo existente en la máquina que hace que trayectorias situadas en distinta coordenada Y ofrezcan distinto error de posición. Esta afirmación queda demostrada gracias al error de rumbo calculado con esta misma técnica (Apartado 3.5.4), pues este error se calcula gracias a las coordenadas X de los distintos puntos, relacionadas directamente con los errores de posición. El error de rumbo resulta similar al calculado con interferómetro láser (misma tendencia y datos en el mismo rango), lo que refleja que el comportamiento de posición de la máquina se ha aproximado de forma similar en ambas técnicas, el interferómetro y el láser-tracker.

El mayor inconveniente de esta técnica está en el error que se comete al pasar los datos obtenidos en un sistema de referencia a otro (Anexo 5), en este proceso se comete un error por el que se obtiene una diferencia media de 30 μm en coordenadas de puntos que se suponen iguales. Sin embargo esta diferencia se ve luego amortiguada pues al realizar la media de todas las medidas, incluyendo una de ellas en el sistema de referencia en el que se trabaja, las diferencias disminuyen.

3.5.2 Error de rectitud xTy

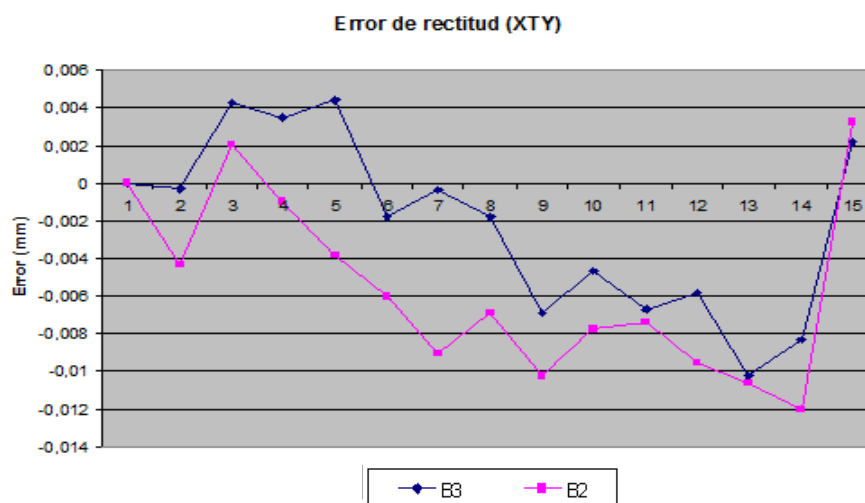


Figura 3.5.2 -1 Error de rectitud xTy (en mm)

En este caso las dos trayectorias ensayadas se acercan mucho más tanto en tendencia como en valores numéricos, mostrando una diferencia máxima entre valores calculados en la misma coordenada X de 8,6 μm con un promedio de 3,5 μm de diferencia a lo largo de toda la muestra.

3.5.3 Error de rectitud xTz

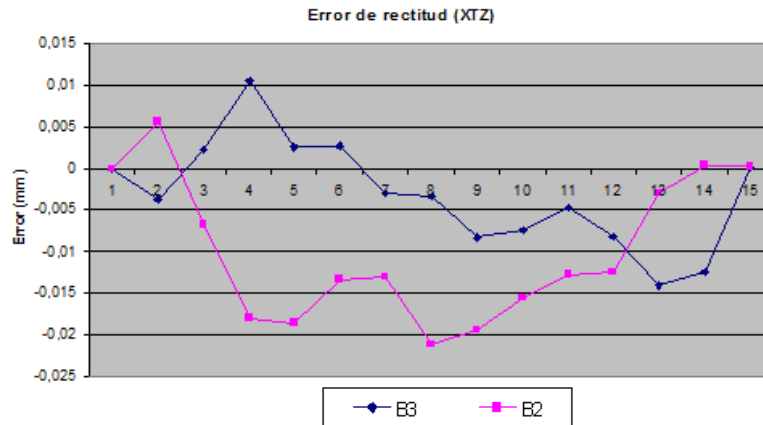


Figura 3.5.3 -1 Error de rectitud xTz (en mm)

Las diferencias existentes entre ambas posiciones aumentan para este error, obteniéndose unas diferencias medias entre puntos colocados en la misma coordenada X de 11 μm llegando a un máximo de 28 μm .

Este aumento tan drástico puede estar debido al error de vuelco, xR_x , que provoca desplazamientos en la coordenada Z para puntos situados en distinta posición Y. Para comprobarlo, se evalúa qué efecto tiene el error de vuelco propio de la máquina (obtenido con nivel electrónico, Apartado 3.3.2) en posiciones separadas 1000,186 mm, justo la distancia que separa a las dos trayectorias ensayadas.

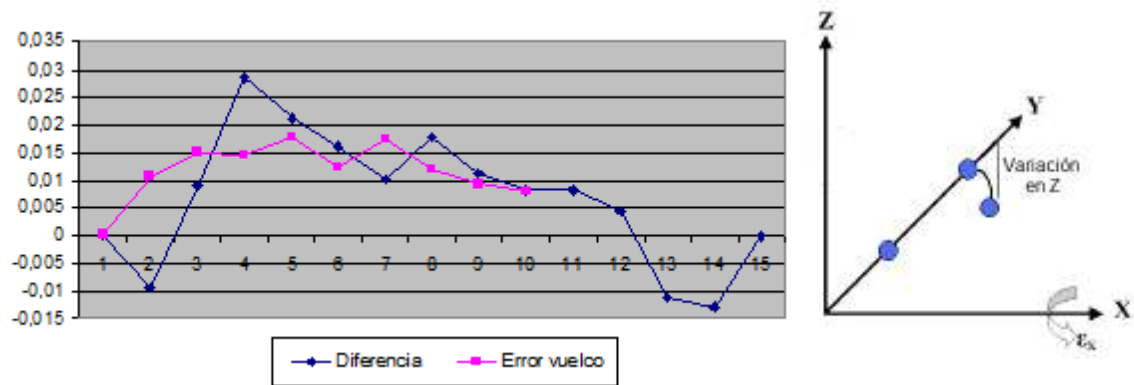


Figura 3.5.3 -2: a) Comparación entre la diferencia de error obtenida en las dos posiciones y la diferencia causada por el error de vuelco al situarse en distinta posición (en mm); b) Efecto del error de vuelco sobre la coordenada Z

En la gráfica se observa como el efecto del error de vuelco se aproxima a la diferencia existente en el error calculado en ambas posiciones, por lo que se puede afirmar que gran parte de la diferencia del comportamiento de la máquina se debe al error de vuelco.

3.5.4 Error de rumbo xRz

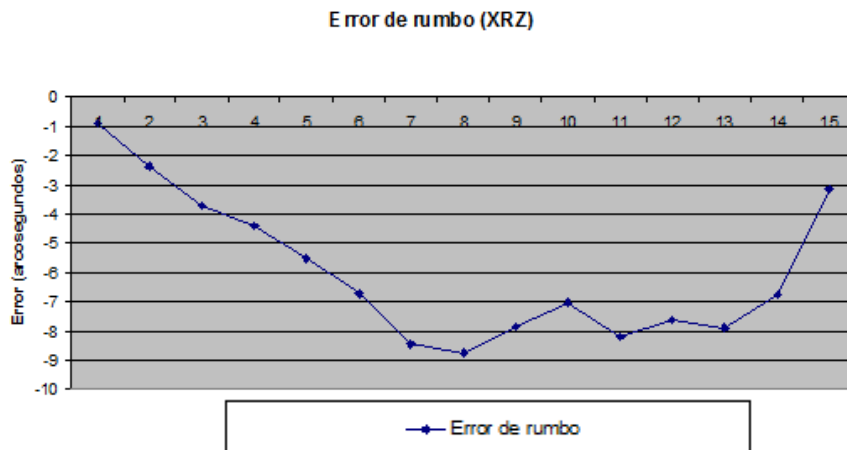


Figura 3.5.4 -1 Error de rumbo xrz (en arcosegundos)

En el cálculo de este error se incorporan los datos obtenidos en dos trayectorias diferentes (Anexo 5), por lo que solo se consigue un único error pues se dispone únicamente de 2 trayectorias.

3.6 Palpador autocentrante y barra de esferas

El palpador empleado durante el ensayo es un prototipo diseñado siguiendo la idea de “cinemática paralela” del cual se ha realizado la calibración previamente cuya configuración así como su principio de funcionamiento es perfectamente conocida (Anexo 3). Conjuntamente con el palpador, se utiliza una barra patrón que contiene por una de sus caras un número de esferas equidistantes entre sí que establecen los puntos de referencia para determinar los errores.

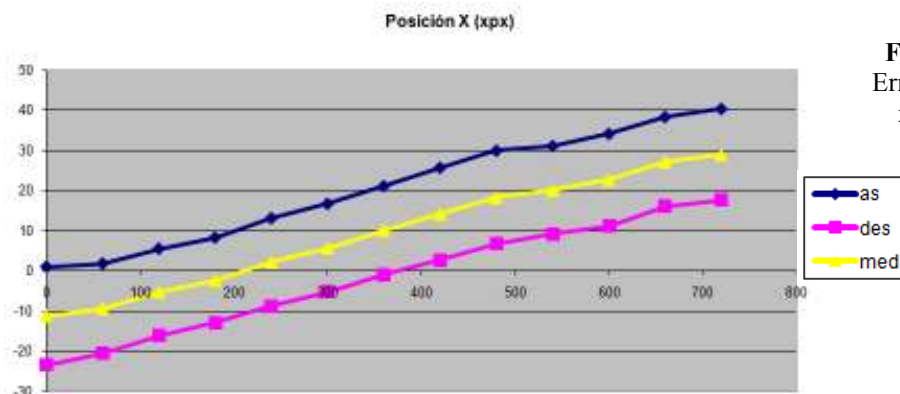
Durante la toma de datos, se han realizado tres ciclos (en sentido creciente (Xc) y decreciente (Xd)) de toma de medidas, hallando para cada uno de ellos las coordenadas del centro de cada una de las 13 esferas que componen la barra patrón. Gracias a esta toma de datos y al posterior tratamiento matemático de los resultados obtenidos, se consiguen calcular los errores de posición y de rectitud, tanto horizontal como vertical. En el Anexo 5, se explica detalladamente el procedimiento.



Figura 3.6-1 Toma de datos con el palpador autocentrante

3.6.1 Error de posición xPx

Mediante el tratamiento en una hoja Excel (Anexo 5) de los resultados obtenidos con el palpador y conocida la geometría y posición del bloque patrón utilizado, se consigue hallar el error de posición de la máquina ensayada.



De su estudio, se puede observar como las tendencias son muy parecidas entre las dos fases, aunque separadas entre sí por unos 10 μm , medida que permanece constante a lo largo del ensayo. Los datos obtenidos en las diferentes series de ensayo muestran un rango máximo de 2,9 μm en la fase creciente con una media de 1,4 μm mientras la fase decreciente muestra un máximo de 3,44 μm y una media de 2,6 μm en la separación entre valores que se suponen iguales. La desviación típica media calculada para cada una de estas series son 0,7 y 1,3 μm respectivamente, mostrando un comportamiento muy repetible y por lo tanto fiable. Su trayectoria se aproxima mucho a una recta en la que el juego es de unos 40 μm .

3.6.2 Error de rectitud xTy

En este ensayo se compensa la posible desviación producida por la trayectoria de la máquina, de forma que el error de rectitud medido se calcula sobre la trayectoria real realizada por la máquina que no será exactamente una trayectoria recta sobre el eje X sino que estará un poco inclinada afectando al valor del error, igual que se hacía en la obtención de este error con el interferómetro láser. En este caso, la aproximación de la trayectoria se ha realizado por mínimos cuadrados.

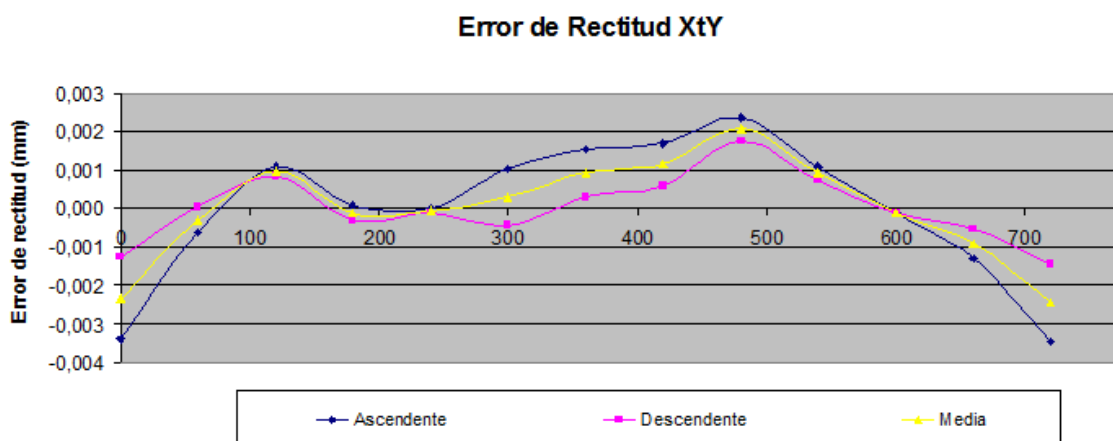


Figura 3.6.2-1 Error de rectitud xTy (en mm)

Analizándola, se puede observar como las tendencias son muy parecidas entre las dos fases, mostrando un rango máximo de 3 μm en la fase creciente con una media de 0,9 μm mientras la fase decreciente muestra un máximo de 1 μm y una media de 0,3 μm en la separación entre valores que se suponen iguales. La desviación típica media calculada para cada uno de estas series son 0,5 y 0,2 μm respectivamente, mostrando, al igual que con el error de posición, un comportamiento muy repetible y por lo tanto fiable.

3.6.3 Error de rectitud xTz

Análogamente al caso anterior se obtiene la gráfica para el error de rectitud xTz.

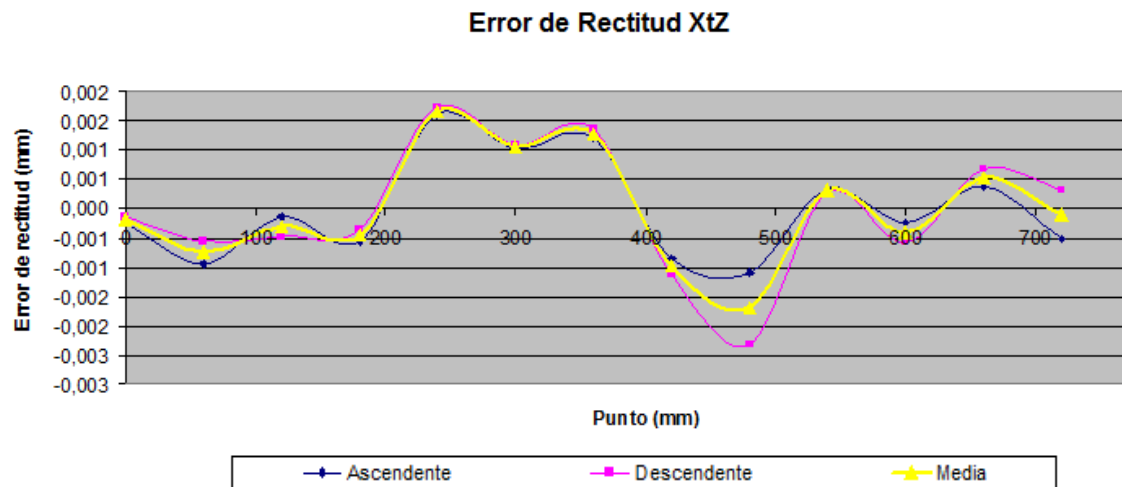


Figura 3.6.3-1 Error de rectitud xTz (en mm)

El análisis de los resultados muestra una gran igualdad entre la fase creciente y decreciente, resultando un rango máximo de 3 μm para la creciente con una media de 1 μm mientras la fase decreciente muestra un máximo de 5,6 μm y una media de 1,5 μm para errores en el mismo punto. La desviación típica media calculada para cada uno de estas series son 0,6 y 0,8 μm respectivamente, siguiendo la tendencia de resultados muy repetibles.

Capítulo 4. Comparación de resultados

En el presente capítulo se pretenden comparar los resultados obtenidos en el ensayo actual por las distintas técnicas, analizando las propiedades y rigurosidad de los errores calculados. Además se realiza un análisis económico de las tres técnicas más completas y que permiten calcular la totalidad de los errores de la máquina-herramienta: el interferómetro láser, el palpador autocentrante y el láser-tracker.

4.1 Error de posición xPx

Para la determinación de este error se ha usado el interferómetro láser, el método de barra y palpador autocentrante y el láser-tracker. Los puntos en los que se ha medido el error a lo largo del eje X han sido los mismos, excepto para el palpador autocentrante + barras de esferas debido a la disposición geométrica de las esferas en la barra, de forma que se puedan comparar la precisión, repetibilidad y prestaciones operacionales de cada técnica.

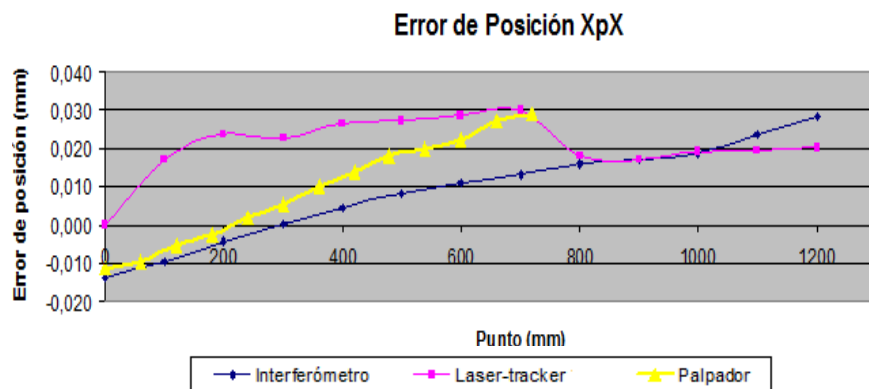


Figura 4.1- 1 Comparación del error de posición xPx, medido con el interferómetro láser, el palpador autocentrante y el láser-tracker

Comparando los errores obtenidos con palpador autocentrante e interferómetro, se observa un alejamiento progresivo de las gráficas, manteniendo ambas una tendencia rectilínea y ascendente. La causa de esta diferencia, puede estar causada por un error de coseno en la aproximación del error con el palpador autocentrante, lo que significa un incorrecto alineamiento del sistema de referencia palpador con el sistema de referencia máquina, provocando este desfase (fig. 4.1-2), o por el hecho de que el palpador realiza un movimiento adicional en Z para alojarse en la posición de palpado.

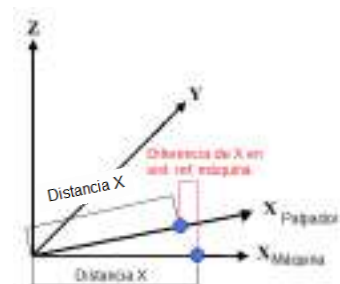


Figura 4.1- 2 Efecto del error de coseno

Para comprobar la influencia de este último efecto se realizó un ensayo adicional con el interferómetro de forma que en cada posición de medida, la máquina realizara un

desplazamiento en Z de subida y bajada de 1mm antes de tomar la medida (fig. 4.1-3). Los resultados obtenidos demuestran como efectivamente al realizar un movimiento en la coordenada Z el error calculado varía, sin embargo el nuevo error calculado presenta un comportamiento totalmente distinto por lo que no se puede asegurar nada sobre el error cometido al realizar movimientos en otro eje más que tiene una influencia sobre los resultados finales.

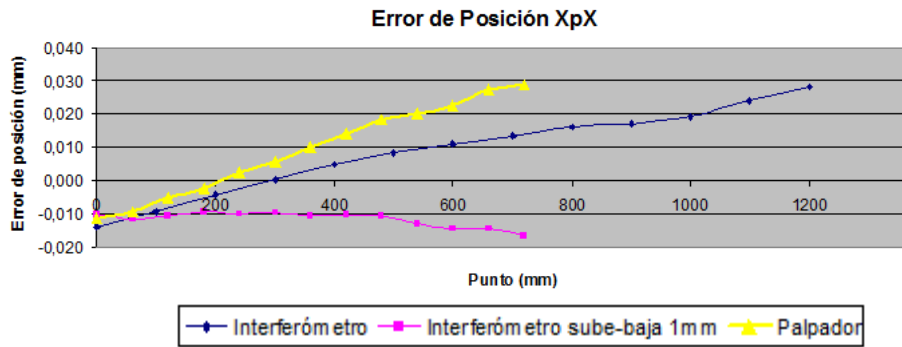


Figura 4.1- 3 Efecto del error cometido al desplazarse la máquina ± 1 mm en el eje Z

Por el contrario, los resultados obtenidos con el láser-tracker muestran una tendencia algo diferente, manteniéndose siempre dentro del rango máximo al que se llega con las otras técnicas. Esta diferencia está causada, probablemente, por el error cometido en el cálculo matemático que incorpora unas aproximaciones que contienen errores. Mediante el estudio y perfeccionamiento de estos modelos se podrían alcanzar unos resultados más ajustados, pues el aparato utilizado ofrece gran repetibilidad en los datos obtenidos que se pierde al trasladarlos a otro sistema de referencia.

4.2 Error de rectitud xTy

En este caso, los métodos utilizados para la determinación del error de rectitud horizontal en el eje X son el interferómetro láser, el palpador inductivo, el método barra + palpador y el láser-tracker.

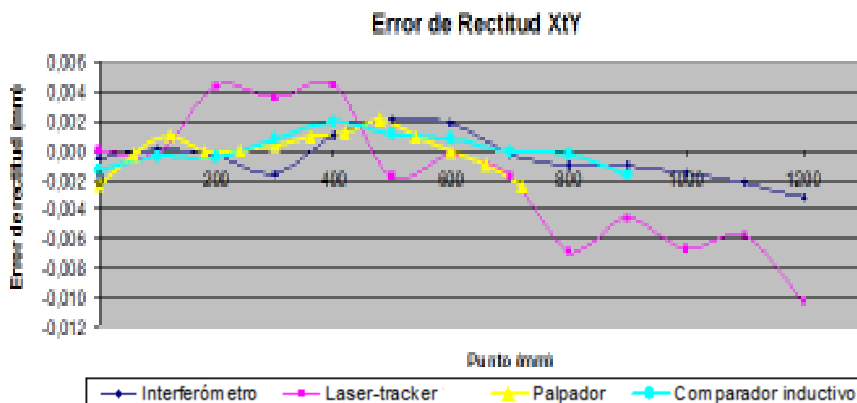


Figura 4.2 - 1 Comparación del error de rectitud xTy, medido con el interferómetro láser, el palpador autocentrante, el comparador inductivo y el láser-tracker

Las gráficas muestran un comportamiento similar para el cálculo del error con todas las técnicas, mostrando una mayor diferencia en el error calculado con el láser-tracker. Con respecto a la tendencia se observa como todas las técnicas ofrecen un comportamiento ascendente del error hasta la coordenada 500 aproximadamente, incluyendo un valle representado por todas ellas. A partir de ese punto todas las aproximaciones del error coinciden en marcar una tendencia descendente más o menos pronunciada.

Si se toma el interferómetro como referencia, las diferencias obtenidas en el cálculo del error con el palpador autocentrante tienen una media menor de $1\mu\text{m}$, demostrando como en este caso ambos métodos obtienen un error muy similar y por lo tanto es indiferente qué técnica utilizar. En el caso del comparador inductivo se obtienen diferencias menores de $2\mu\text{m}$, demostrando que a pesar de ser una técnica menos fiable y precisa, en este caso obtiene unos resultados muy ajustados a los del interferómetro. El láser-tracker, por otro lado, presenta diferencias de hasta $7\mu\text{m}$ con una media de $4\mu\text{m}$. Estas diferencias son bastante altas comparadas con las obtenidas con las otras técnicas y el rango en que se mueven, alrededor de $5\mu\text{m}$, por lo que no presenta un comportamiento muy fiable. Sin embargo el comportamiento representado tiene una tendencia similar, lo que demuestra como la diferencia se debe probablemente al modelo matemático por el que se cometen errores, aumentado el rango de las medidas y su valor.

4.3 Error de rectitud xTz

Como en el caso anterior, se usan el interferómetro, el palpador + barra de bolas, el comparador inductivo y el láser-tracker.

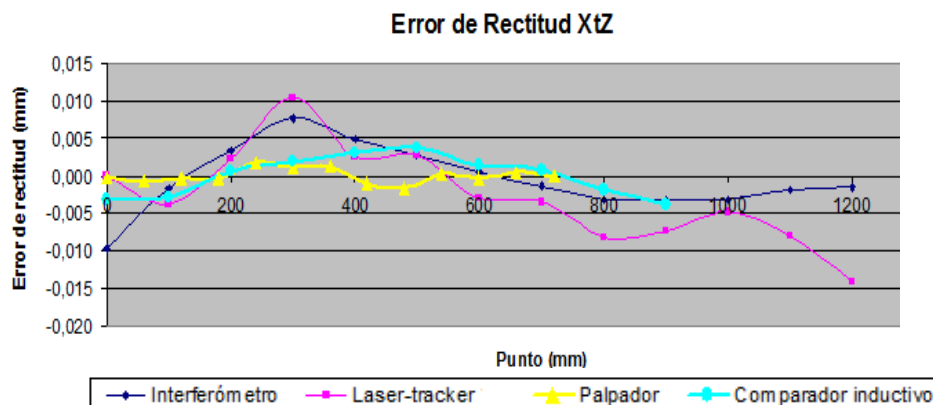


Figura 4.3 - 1 Comparación del error de rectitud xTz, medido con el interferómetro láser, el palpador autocentrante, el comparador inductivo y el láser-tracker

En este caso la tendencia mostrada por el interferómetro se desmarca de las demás, seguida únicamente por el láser-tracker. La gráfica muestra un pico de error en la posición $X=300\text{ mm}$ para las gráficas del error del interferómetro y el láser-tracker, sin embargo el palpador y el comparador muestran una tendencia más suavizada que se

aproxima en la parte final más a las trayectorias descendentes del interferómetro y láser-tracker.

Comparando de nuevo con el interferómetro láser, se observan diferencias con el palpador autocentrante con un máximo de hasta 7 μm pero con una media de 4, lo que marca una peor aproximación a este error, marcado en gran parte por la diferencia en el primer tramo donde el interferómetro tiene una tendencia ascendente muy acusada. Esta diferencia puede estar causada a errores en el cálculo por parte del palpador o simplemente a un comportamiento diferente de la máquina. El comparador inductivo, por su parte, presenta un comportamiento similar al palpador en la primera parte de la trayectoria y muy próximo al interferómetro en la segunda, marcando diferencias con este de 2 μm . En este caso las diferencias pueden estar causadas a un error de cálculo debido a la presencia de suciedad en la mesa o en la regla de rectitud, muy difícil de limpiar y que puede alterar el resultado. Aún así los resultados obtenidos son muy próximos a los del interferómetro.

El láser-tracker presenta en este caso, un comportamiento bastante similar al interferómetro, siguiendo su misma tendencia a lo largo de toda la trayectoria. Aún habiendo puntos que se diferencian en más de 10 μm , la media de diferencias es de 4, por lo que a pesar de los errores cometidos en la aproximación, se obtiene un error bastante coherente.

4.4 Error de cabeceo xRy

Para este error cambiamos de instrumentos, usando en este caso el nivel y el interferómetro únicamente.

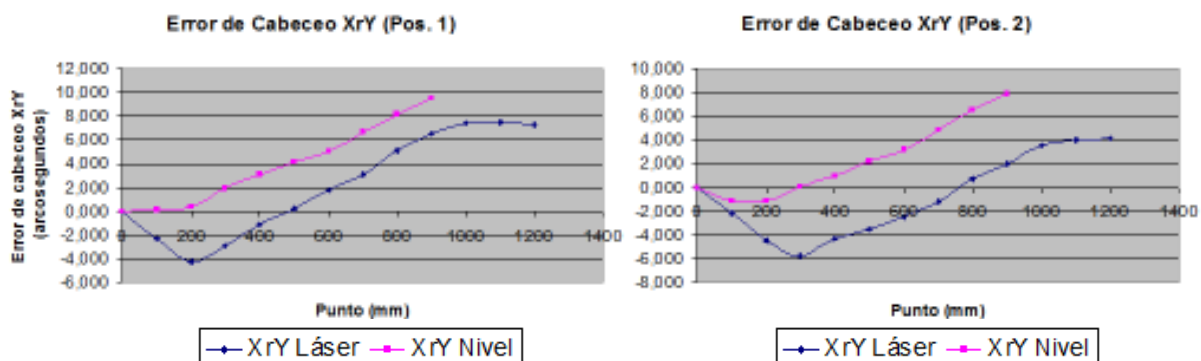


Figura 4.4-1 Comparación del error de cabeceo xRy medido con el interferómetro láser y el nivel electrónico: a) posición 1 ; b) posición 2

Como se puede observar en las gráficas, los resultados obtenidos por ambos métodos tienen una tendencia muy parecida en ambas posiciones, lo que demuestra como los dos aparatos sirven indistintamente para calcular este error. Sin embargo sí que se observa una diferencia entre los valores que se mantiene estable a lo largo de todo el rango de medida, en la posición 1 esta diferencia tiene como valor medio 3,3 arcosegundos mientras que en la posición 2 aumenta hasta los 4,4. Esta diferencia en los resultados no es importante puesto que marca únicamente la existencia de un Offset,

fácilmente eliminable. Lo realmente destacable es la proximidad en los resultados y el resultado obtenido con el mismo comportamiento.

4.5 Error de rumbo xRz

En este caso se utilizan el interferómetro láser y el láser-tracker.

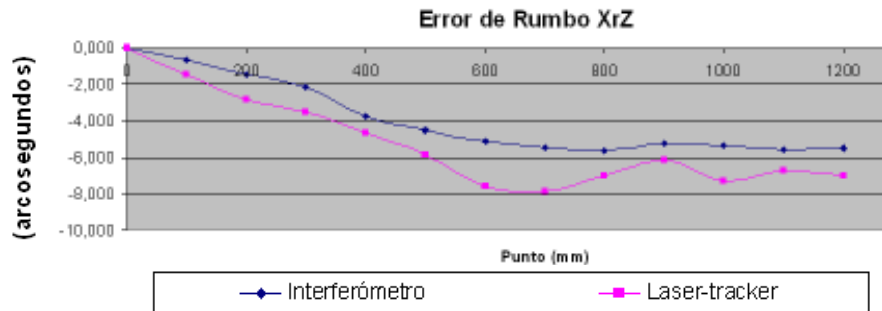


Figura 4.5-1 Comparación del error de rumbo xRz medido con interferómetro láser y láser-tracker

Los errores obtenidos muestran tener un comportamiento muy similar, ajustando en ambos casos el error de rumbo a una trayectoria descendente en la que se observa una disminución de la pendiente en la parte final. La diferencia que muestran las trayectorias ofrece una media de 1,3 arcosegundos con un máximo de 2,4. Esta diferencia es menor que la mostrada en el error de cabeceo entre el nivel e interferómetro, por lo que se demuestra cómo para este error en concreto, el modelo matemático usado con el láser-tracker aproxima de forma muy acertada el comportamiento de la máquina.

Esta similitud entre errores, confirman además que la diferencia de errores de posición obtenida con el láser-tracker para las dos trayectorias ensayadas se debe únicamente al comportamiento de la máquina puesto que el error de rumbo calculado en este apartado se obtiene por cálculos matemáticos de los mismos datos usados para el error de posición. Esto demuestra, a pesar de las diferencias obtenidas, que el modelo utilizado con el láser-tracker es robusto, y que la pérdida de exactitud se comete en la transformación de las coordenadas de un sistema de referencia a otro.

4.6 Error de perpendicularidad xWy

El error de perpendicularidad se mide con el interferómetro y con el comparador.

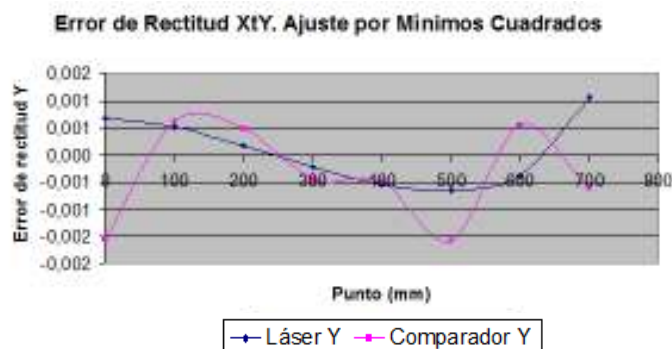


Figura 4.6-1 a) Comparación del error de perpendicularidad xWy medido con interferómetro láser y comparador inductivo

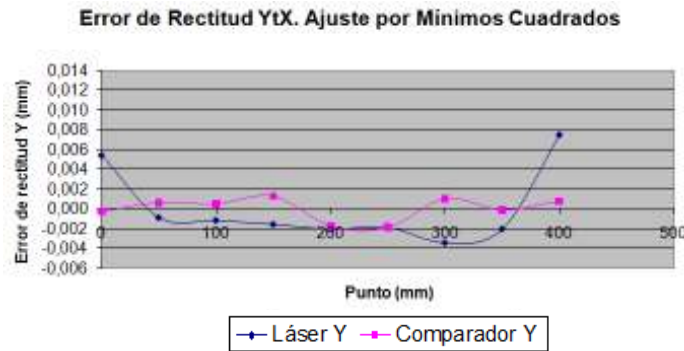


Figura 4.6-1 b) Comparación del error de perpendicularidad xWy medido con interferómetro láser y comparador inductivo

- Interferómetro láser:

$$xWy = \varphi_{xy} - \varphi_{yx} + 0,23 = 31,17 \text{ arcosegundos } (\approx 151,11 \mu\text{m/m})$$

- Comparador inductivo:

$$xWy = \varphi_{xy} - \varphi_{yx} + 1,031 = 62,91 \text{ arcosegundos } (\approx 305 \mu\text{m/m})$$

En este caso el resultado obtenido es el doble en el comparador inductivo que en el interferómetro láser, y al igual que ocurría con los resultados de errores anteriores, las gráficas muestran comportamientos algo dispares. Se observa como el interferómetro aporta comportamientos más suavizados mientras que los errores calculados con el comparador alteran mucho más la tendencia seguida, sin embargo, ambos ofrecen valores similares para cada punto en concreto, por lo que el error global no será excesivamente diferente.

Para este error se precisa aproximar la recta seguida por el instrumento en el ensayo y a partir de esta calcular el resultado, por lo que las variaciones que presenta el comparador hacen que la recta de aproximación no sea tan exacta como en el caso del interferómetro, que tiene un comportamiento más suavizado. Además el error introducido por la escuadra de rectitud en el caso del comparador es 4 veces mayor, aumentando la incertidumbre de medida. Por lo tanto se reafirma la idea de que el comparador es menos preciso que el interferómetro, más aún en el cálculo de perpendicularidades.

4.7 Comparación global

Con lo observado durante todos los resultados obtenidos, se pueden sacar conclusiones sobre las características y fortalezas de cada uno de los métodos, permitiendo comparar cada uno de ellos de forma global. También se valoran las dificultades encontradas durante el ensayo a la hora de realizar el análisis con cada uno de estos instrumentos.

- El interferómetro láser presenta muy buena repetibilidad en las medidas y proporciona una medida muy fiable. El montaje de las lentes precisa de tiempo para su preparación, sin embargo ese tiempo disminuye conforme te familiarizas con el método, reduciéndolo incluso en un 50%.
- El palpador inductivo y la barra de perpendicularidad proporcionan una fiabilidad menor que el interferómetro debido a la interacción del palpador con un sólido. La suciedad existente en la máquina y en la regla puede propiciar la anulación de los datos tomados. Hay que poner mucha atención en la limpieza de la regla para que guarde su rectitud.
- El nivel electrónico presenta una gran facilidad de montaje y gran repetibilidad en sus lecturas, esto hace que sus resultados sean fiables. Sin embargo, para su uso se necesita una zona de apoyo que no todas las máquinas poseen (las máquinas que incorporan los movimientos de los tres ejes en el cabezal no lo tienen) y tiene un alcance limitado, solo mide errores angulares.
- El palpador autocentrante + barra de bolas presenta a veces una tendencia en el error distinta de la encontrada con los otros métodos, sin embargo este método aproxima más los movimientos de ensayo a los reales de la máquina, pues precisa de un movimiento en un segundo eje para el palpado de la bola. Además, reduce el tiempo de montaje y de ensayo con respecto al interferómetro láser.
- El láser-tracker permite agrupar la averiguación de las 21 componentes del error en un solo ensayo, por lo que reduce mucho el tiempo necesario para verificar una máquina-herramienta. Además, los datos obtenidos presentan mucha repetibilidad en las distintas series. Su punto débil se encuentra en el modelo matemático del error, el cual necesita ser perfeccionado.

Además, se añade en el Anexo 7 una comparación de los resultados obtenidos con los datos disponibles de ensayos anteriores. Al tratarse la tarea de verificación de un proceso continuo en el que se debe controlar continuamente el comportamiento de la máquina (Anexo 1), se dispone de datos de los errores geométricos de la máquina en épocas anteriores. Estos datos obtenidos en ensayos previos se comparan con los actuales para evaluar la evolución de la máquina así como para demostrar la consistencia de los instrumentos utilizados.

4.8 Análisis económico

Para evaluar la conveniencia de uso de una u otra técnica de verificación se presenta a continuación un simple análisis, a modo general, que establece la elección más adecuada desde un punto de vista económico y tomando dos supuestos. En el primero de ellos, se evalúa la posición de una empresa dedicada a verificación de máquinas-herramienta que adquiere los diversos aparatos necesarios para la verificación

y pretende poner un precio razonable a cada uno de sus servicios para conseguir beneficios a partir de dos años. El segundo supuesto considera el punto de vista de una empresa que pretende verificar una de sus máquinas y quiere estudiar qué tipo de servicio le conviene más en función de sus características.

Así pues se procede a hacer el análisis económico de las tres técnicas que se pretenden comparar: el interferómetro láser, el láser-tracker y el palpador autocentrante con barra de bolas.

1) Punto de vista de una empresa de verificación

Se tiene en cuenta el precio de adquisición de cada uno de los aparatos así como el tiempo que toma cada uno de ellos en hacer una verificación completa de una máquina-herramienta, es decir, en encontrar las 21 componentes del error geométrico. En este proyecto, se han ensayado y tomado los tiempos para el cálculo de los siguientes errores:

	Interferómetro	Láser-tracker	Palpador autocentrante
Posición (xPx)	80	180	35
Rectitud (xTy)	100		45
Rectitud (xTz)	100		45
Cabeceo (xRy)	90		90
Rumbo (xRz)	90		90
Vuelco (xRx)	90		90
Perpendicularidad (xWy)	200		90
Perpendicularidad (xWz)	250		100
Tiempo total	1000	180	585

Figura 4.8-1 Minutos empleados en cada ensayo

Estos errores son los tomados en un eje (el tiempo invertido en el error de vuelco con el interferómetro y el de perpendicularidad xWz con el palpador son aproximaciones calculadas por similitud con los ensayos realizados para otros errores), para encontrar los 21 errores, se deben hallar los errores en los tres ejes de la máquina, por lo que habrá que multiplicar por 3 el tiempo consumido en hallarlos, sin contar los errores de perpendicularidad que solo hay que calcularlos 1 vez. Este supuesto es válido y acertado para el interferómetro láser, sin embargo, en los otros dos métodos, los distintos errores se calculan gracias al conocimiento de las posiciones de distintos puntos a los que se mueve la máquina. Mediante la combinación de las posiciones reales de esos puntos y las trayectorias seguidas por la máquina, se pueden conseguir pues los distintos errores en cada uno de los ejes, disminuyendo el número de ensayos a realizar y por lo tanto el tiempo empleado. Así pues se puede considerar que el tiempo total empleado en verificar completamente una máquina-herramienta con estos métodos es el doble del consumido para hallar los errores en un único eje:

	Minutos	Horas
Interferómetro láser	2100	35
Láser-tracker	360	6
Palpador autocentrante	1170	20

Figura 4.8-2 Tiempo empleado en verificar completamente una máquina-herramienta

Además disponemos de los precios medios de adquisición de cada uno de los aparatos:

	€	
Interferómetro láser	36000	
Láser-tracker	240000	
Palpador autocentrante	Palpador : 2000 Barra de esferas : 3000	5000

Figura 4.8-3 Precio de adquisición de cada aparato [27][23]

La siguiente suposición considera un calendario laboral de 360 días/año (12 meses de 30 días) y por lo tanto 51.4 semanas, que por simplificar en el cálculo se tomarán 51 semanas. Se toma además una empresa tipo que trabaja 6 días a la semana durante 8 horas al día (suposición bastante general pues muchas empresas siguen este horario). También se establece el coste para la empresa del operario que lleva a cabo las tareas de verificación, que al tratarse de un empleado especializado y con experiencia en este campo, se toma un valor de unos 25 €/hora [PAS Universidad de Zaragoza].

Para esta empresa tipo que realiza labores de verificación de máquina-herramienta se va a calcular el precio teórico que debería establecer a cada proceso de verificación, para recuperar el capital invertido en dos años, de forma que todos los ingresos obtenidos a partir de ese periodo sean “brutos” para la empresa. La suposición de un *payback* de dos años es aceptable pues estos aparatos tienen una vida útil superior a los cinco años, además como la empresa continuará realizando tareas de verificación, no se tiene en cuenta el valor residual de los equipos. En este cálculo se tienen en cuenta todos los datos aclarados anteriormente así como una última suposición que establece un beneficio del 25% para la empresa por cada uno de los servicios realizados.

a) Interferómetro láser

- Tiempo total necesario = 35 h
- Nº días laborables (8h) empleados = $35/8 = 4.375$ días

Al ser semanas laborables de 6 días y para no dividir la verificación en periodos distintos, se toma que se puede hacer 1 verificación por semana. Al hacer esto se supone además que la empresa no estará trabajando el 100% de sus horas disponibles, sino que

trabaja entorno al 70% de su capacidad, lo que nos da un pequeño margen de maniobra a la hora de calcular el precio del servicio. Para los supuestos siguientes, se tomará igualmente que la empresa trabaja al 70% de su capacidad total.

- N° verificaciones por semana = 1
- N° verificaciones al año = $51 * 1 = 51$
- N° verificaciones en dos años = $51 * 2 = 102$

La siguiente ecuación establece el precio que se debe poner al proceso de verificación para recuperar el capital invertido en dos años:

$$P_v = (C_0 + (S_o * N_h)) / N_v$$

Ec. 4.8-1

P_v = Precio verificación
 C_0 = Capital invertido (Precio aparato)
 N_v = N° verificaciones en dos años
 S_o = Coste operativo por hora
 N_h = N° horas necesarias para verificar

Según la ecuación anterior, el precio de la verificación con interferómetro láser es:

$$P_v = (36000 + (25 * 35)) / 102 = 362 \text{ €}$$

Si suponemos un beneficio del 25% :

$$P_v = 241 * 1.25 = 453 \text{ €}$$

Siguiendo el mismo proceso para el láser-tracker y el palpador autocentrante, se completa la siguiente tabla:

	€ / verificación
Interferómetro láser	453
Láser-tracker	527
Palpador autocentrante	81

Figura 4.8-4 Precio de verificación de cada método

2) Punto de vista de una empresa que contrata el proceso de verificación

Ahora se va a analizar no solamente el coste económico que supone contratar un proceso de verificación, sino también las pérdidas que supone mantener inactiva la máquina-herramienta durante el tiempo en que se lleva a cabo su verificación. De este modo se analiza el coste total del proceso de verificado para la empresa que lo contrata.

La ecuación que nos permite hallar este coste total es la siguiente:

$$C_t = P_v + (P_h * N_h)$$

Ec. 4.8-2

C_t = Coste total
 P_v = Precio verificación
 P_h = Producción horaria de la máquina
 N_h = N° horas necesarias para verificar

a) Interferómetro láser

$$C_t = 453 + (P_h * 35)$$

b) Láser-tracker

$$C_t = 527 + (P_h * 6)$$

c) Palpador + barra de bolas

$$C_t = 81 + (P_h * 20)$$

Con estos datos se procede a la comparación del coste total de los distintos métodos dos a dos, de forma que se consiga el valor umbral de la producción horaria de la máquina a partir del cual uno de los métodos pasa a ser más rentable que el otro.

- *Interferómetro – Láser-tracker*

$$C_t (\text{Interferómetro}) > C_t (\text{Láser-tracker}) ; 453 + (P_h * 35) > 527 + (P_h * 6)$$

$$P_h > 2.55 \text{ €/h}$$

La solución de la ecuación anterior, demuestra que a partir de una producción horaria de 2.55€ en una máquina-herramienta, el coste de su verificación con el interferómetro láser pasa a ser mayor que con el láser-tracker. Por lo tanto, para una máquina cuya producción sea mayor de 2.55 €/h (todas prácticamente), se recomienda desde el punto de vista económico una verificación con láser-tracker.

- *Interferómetro – Palpador*

$$C_t (\text{Interferómetro}) > C_t (\text{Palpador}) ; 453 + (P_h * 35) > 81 + (P_h * 20)$$

$$P_h > -24.8 \text{ €/h}$$

En este caso, la producción a partir de la cual pasa a ser menor el coste de verificación con palpador que con interferómetro es negativa, lo que muestra que para todos los casos (se supone que todas las máquinas en funcionamiento tienen una producción positiva, en caso contrario, la empresa perdería dinero y le saldría más rentable eliminar la MH del proceso productivo), es más rentable realizar un proceso de verificación con palpador + barra de bolas que con interferómetro.

- *Láser-tracker – Palpador*

$$C_t (\text{Láser-tracker}) > C_t (\text{Palpador}) ; 527 + (P_h * 6) > 81 + (P_h * 20)$$

$$P_h < 31.86 \text{ €/h}$$

Por último, se observa como el coste de verificación con láser-tracker es mayor para máquinas con producción menor de 31,86 €/h, por lo tanto se demuestra que económicamente es mejor el uso del láser-tracker en MH con producción mayor de 31,86 €/h, si se compara con el palpador autocentrante.

Para concluir el estudio y agrupar todos los datos hallados anteriormente, en la figura 7.2-5 se expone gráficamente la conveniencia de uso de uno u otro sistema en función de la producción horaria de la máquina-herramienta a evaluar.



Figura 4.8-5 Comparación de la conveniencia de uno u otro método en función de la producción en €/h

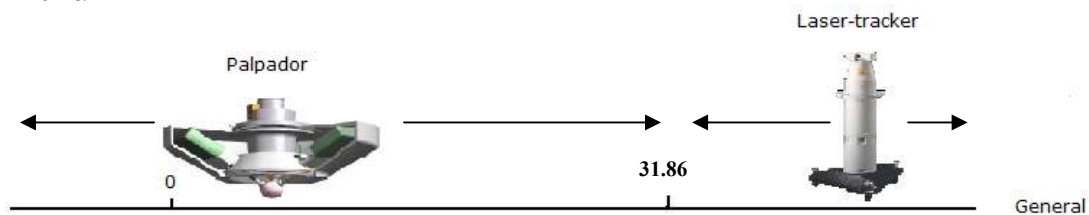


Figura 4.8-6 Conveniencia de uno u otro método en función de la producción en €/h

Como se observa en la comparación general, los métodos más ventajosos económicamente pasan a ser el palpador autocentrante y el láser-tracker, resultando más beneficiosos que el interferómetro láser. En el caso de tomar otros supuestos en los que el beneficio obtenido por la empresa que realiza la verificación aumentaran o el periodo de payback fuera mayor, los resultados serían parecidos resultando siempre perjudicado el interferómetro láser pues siempre se va a ver superado por el palpador autocentrante que tiene un coste de adquisición mucho menor. Además entre el palpador y el láser-tracker siempre va a haber un umbral en el que pase a ser mejor el segundo método debido a la diferencia de horas necesarias para la verificación, que es mucho menor en el láser-tracker. Para un análisis más específico, sería necesario repetir los cálculos con datos reales.

Capítulo 5. Generación de software informático

5.1 Utilización de herramientas informáticas

Las herramientas informáticas que se utilizan en los ensayos para gestionar y manejar la información de verificación son diferentes. Los programas que sirven como complemento de los instrumentos utilizados, permiten la evaluación y representación gráfica de los datos medidos en las MH. Gracias a esto, los resultados se analizan más fácilmente y por lo tanto se trabaja de forma más sencilla y eficaz con los resultados experimentales para compensar los errores.

Las actuales técnicas de verificación disponen de programas de control que presentan las siguientes características:

- Establecen la comunicación entre el instrumento de medida y el ordenador.
- Generan el programa de ensayo según los ciclos de ensayo elegidos.
- Capturan los datos medidos por los dispositivos mediante sistemas de adquisición de datos.
- Compensan condiciones ambientales del entorno del ensayo, es decir, la temperatura, humedad y presión del aire. En algunos casos, también realizan una compensación lineal de los errores geométricos que pueden ser transferidos en las tablas de compensación a los controles numéricos.
- Analizan y evalúan los datos medidos mediante análisis matemático para obtener las diferentes funciones de error según normas internacionales y nacionales (ISO 230-2, ASME B5.54, etc.).
- Representan gráficamente los errores para presentarlos en formatos predefinidos en informes de ensayo.

Además de manejar y comprender el principio de funcionamiento de los software utilizados durante la realización del ensayo, se han generado dos programas que permiten realizar de forma rápida y sencilla diferentes tareas relacionadas con la máquina-herramienta y su verificación. A continuación se explica el principio de funcionamiento y la necesidad de crear un programa generador de código CNC y un programa que genere una tabla de compensación para una máquina-herramienta.

5.2 Creación de un programa generador de código CNC

Durante la generación de este proyecto, se vio la posibilidad de ampliación del estudio realizado mediante la compensación de errores por medio de un sistema pos-procesador capaz de alterar el código de control numérico y minimizar así los errores geométricos que tiene la máquina (Anexo 4). Para este propósito se ha comenzado a dar los pasos previos y se ha creado un programa que genera el código CNC necesario para medir los datos de los puntos que generan la nube que más adelante servirá de base en la compensación.

La estructura del programa, establece una interrelación con el usuario de forma que en función de los datos introducidos por este y requeridos para el funcionamiento, se crea una trayectoria de máquina que sigue una u otra dirección y de una u otra forma parando en los puntos especificados y el tiempo establecido.

Así pues el programa permite realizar las siguientes funciones especificadas:

- Introducción por parte del usuario de todos los datos necesarios para la creación del código y que definen perfectamente los puntos en los que se parará la máquina para la obtención de datos. Se pide la introducción de desplazamiento total en cada una de las direcciones (X, Y, Z) y el número de puntos en los que parar en cada eje. También se precisa la introducción del tiempo de parada en cada punto, la distancia de más que se mueve la máquina al finalizar el sentido decreciente o creciente para que aparezca el juego y el número con el que se guardará el programa.
- Establecimiento del eje principal de movimiento (X, Y ó Z), de forma que la máquina recorre la nube de puntos avanzando por el eje principal y sobrepasándose la cantidad establecida para que aparezca el juego en esa dirección.

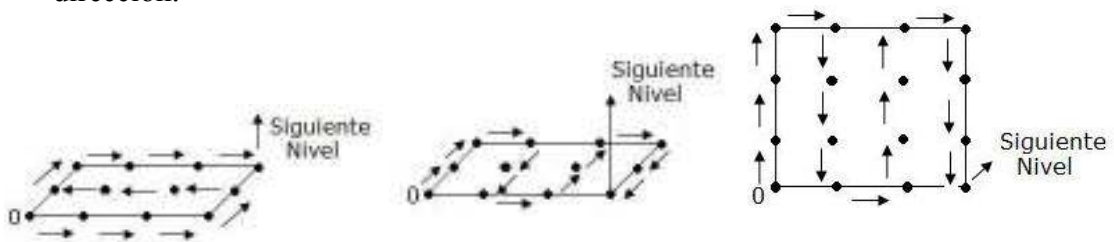


Figura 5.3.3-1 Recorrido de la máquina en función del eje escogido como principal:
a) eje X; b) eje Y; c) eje Z

- Elección de las diferentes opciones posibles a la hora de recorrer la nube de puntos generada. Las posibles opciones son: Con juego, ida/vuelta, Mismas trayectorias y Retorno a 0,0,0 al final del programa.
- Avisar si el dato introducido es incorrecto o no válido y proporcionar explicación de cada una de las posibles elecciones que se pueden elegir.

- Guardar el programa generado en un archivo de texto preparado para ser introducido a la máquina manualmente en el control o por DNC.

El manual de usuario del programa está explicado en el Anexo 6. En él, se detallan las instrucciones para su utilización, así como, la información que aparece en cada pantalla.

Figura 5.2-1 Programa de generación de código CNC

5.3 Generación de un programa para el cálculo de los valores de compensación

En el Anexo 4, se expone que las actuales máquinas-herramienta incorporan en su control CNC la posibilidad de introducir una tabla de compensación con las posiciones reales, las calculadas por los instrumentos de verificación, y las posiciones teóricas, a las que se manda la máquina, de forma que el propio sistema calcule una compensación del error. Para facilitar este paso se crea un programa que genere esta tabla de compensación para la fresadora de ensayo a partir de los errores obtenidos.

En el Anexo 6, se explica el proceso de generación y el modo de empleo del programa creado para el cálculo de los parámetros de compensación a incluir en el código CNC de las máquinas-herramienta. Mediante este programa, además, se introducen las bases de un posible estudio futuro en el que se desarrolle esta tecnología y se genere un sistema de compensación interactivo que introduzca directamente en el control la corrección geométrica precisa.

En el algoritmo del programa se integra el modelo matemático de los movimientos de la máquina y al introducir los datos precisos de los puntos en los que se deben compensar los errores, se puede completar la tabla de compensación y por lo tanto mejorar su comportamiento geométrico.

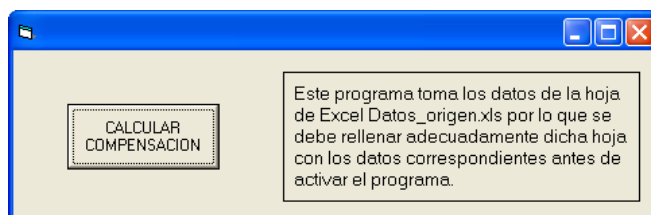


Figura 5.3-1 Programa para hallar la tabla de compensación

En la pantalla principal, se expone que el usuario debe rellenar la hoja de Excel: *Datos_origen.xls* (fig. 5.3-2) con cada uno de los seis parámetros de error (3 de traslación y 3 de rotación) así como la coordenada X (en mm) de cada uno de los puntos donde hallar la corrección. Al clicar sobre el botón, el programa devuelve en una hoja Excel guardada con el nombre elegido por el usuario, la tabla de compensación calculada.

El manual de usuario del programa está explicado en el Anexo 6. En él, se detallan las instrucciones para su utilización, así como, la información que aparece en cada pantalla.

Figura 5.3-2 Hoja Excel *Datos_origen.xls* donde se introducen los errores obtenidos y donde se guardan los datos de compensación calculados.

5.3.1 Resultados obtenidos para la MH ensayada

RESULTADO COMPENSACIÓN			
Posiciones reales			
Coordenada X (mm)	X (mm)	Y (µm)	Z (µm)
0	-0,014	-5,439	-9,991
100	99,990	-1,230	-1,633
200	199,998	2,653	3,448
300	300,000	1,614	7,641
400	400,005	3,330	4,603
500	500,008	3,012	2,677
600	600,011	1,808	0,422
700	700,013	-0,468	-1,279
800	800,016	-2,046	-3,102
900	900,017	-3,033	-3,281
1000	1000,019	-3,292	-3,075
1100	1100,024	-2,842	-1,899
1200	1200,028	-1,351	-1,588

Una vez realizado el programa, se comprueban los resultados que ofrece al introducir los datos obtenidos para la máquina de ensayo con la técnica del interferómetro láser en la trayectoria 1. Los resultados obtenidos se muestran en la figura contigua.

Figura 5.3.1-1 Resultados obtenidos con el programa creado

Capítulo 6. Conclusiones

Para finalizar la memoria de este proyecto fin de carrera, se exponen a continuación los objetivos alcanzados y los posibles trabajos futuros para los que este proyecto puede servir como base y que debido al tiempo necesario en su realización no se han podido involucrar en este estudio.

6.1 Tareas realizadas

A lo largo de este proyecto fin de carrera, se ha llevado a cabo el estudio, la explicación y desarrollo de los errores que aparecen en las máquinas-herramienta, detallando los distintos comportamientos que presentan y las causas que motivan estos comportamientos, llegando a la conclusión de que el proceso de verificación de máquina-herramienta es imprescindible para compensar la multitud de causas que afectan el comportamiento de la máquina.

Para la compensación de estos errores existen multitud de técnicas disponibles en el mercado que permiten mediante distinto principio de medida la caracterización de diferentes errores existentes en la máquina. Durante la realización del trabajo, se lleva a cabo el estudio de la evolución de estas técnicas, con el fin de conocer sus principios de medida, los componentes que los integran y los errores que son capaces de medir.

Basándose en dos de las técnicas novedosas de verificación, el palpador autocentrante + barra de bolas y el láser-tracker, se han explicado detalladamente los modelos matemáticos que los modelizan. Además se ha llevado a cabo un proceso de calibrado del palpador para su posterior uso en un ensayo experimental. Este proceso permitió conocer profundamente el funcionamiento y partes componentes del palpador, así como familiarizarse con el sistema informático que controla el proceso y los elementos diseñados expresamente para el mismo. Gracias a este paso previo se pudo garantizar que las medidas tomadas en el ensayo realizado posteriormente eran correctas y caracterizaban correctamente los movimientos de la máquina.

El trabajo principal, y por lo tanto la parte que más esfuerzo supuso, realizado en este estudio, ha sido la de llevar a cabo la verificación completa de un eje geométrico en una máquina-herramienta mediante distintas técnicas, explicando los errores posibles en ella y las causas más probables de su aparición. Desarrollando además un modelo matemático del cálculo del error para el láser-tracker.

De las diferentes técnicas directas de medición usadas, se ha explicado su principio de medida, así como la manera en que se debe realizar el análisis sobre la máquina para que el ensayo sea correcto y los datos tomados aceptables. Del mismo modo se han comparado sus resultados, y observando la repetibilidad de ellos en distintas posiciones y supuestos, llegando a la conclusión de que:

- El interferómetro láser mostró ser el equipo que da lecturas más repetibles bajo mismas condiciones para todo tipo de medida, aunque para medidas angulares era el nivel electrónico el que presentaba rangos menores.
- El palpador inductivo + regla de rectitud precisa una evaluación exhaustiva de la limpieza en la zona de ensayo, de lo contrario los datos tomados no son repetibles y por lo tanto son no válidos.
- Los dos sistemas más novedosos, palpador autocentrante y láser-tracker, presentan resultados fiables y repetibles y el método de ensayo es sencillo, la mayor desventaja es que su adquisición es complicada o que son sistemas todavía desconocidos. El láser-tracker es muy caro y no tiene un modelo matemático definido y preciso para el cálculo del error y el palpador no se asocia con verificación de máquina-herramienta (tradicionalmente usado con MMC)

Según el estudio, destacan 3 grandes técnicas de verificación: el interferómetro láser, los sistemas que utilizan artefactos patrón y palpadores (palpador autocentrante) y el láser-tracker. Todos estos métodos son capaces de medir las 21 componentes de error de una máquina de tres ejes lineales y proporcionan bajas incertidumbres de medida. Sin embargo existen grandes diferencias entre ellos en el precio de adquisición y el tiempo necesario para la verificación. Hoy por hoy, los sistemas basados en interferometría láser, siguen siendo la técnica de referencia aunque en los últimos años, debido a la mejora tecnológica de los otros métodos, la supremacía ejercida por ellos ha sufrido una tendencia decreciente.

En el capítulo 4, se comparan además los resultados obtenidos con las distintas técnicas, si establecemos el sistema de interferómetro láser como el de referencia, pues es el más usado hoy en día en los sistemas de verificación, se establecen los siguientes criterios con las distintas técnicas:

- El palpador inductivo y artefacto patrón (regla y escuadra), proporciona unos resultados muy parecidos para la rectitud horizontal, con una desviación máxima de $6\mu\text{m}$ en un punto, pero con una media que no llega a las $2\mu\text{m}$ de diferencia, al igual que en la medida de rectitud vertical que da unos resultados con la misma tendencia y con una diferencia media respecto al interferómetro de $2\mu\text{m}$. En la medición del error de perpendicularidad, el error encontrado tiene una diferencia con el láser de 5 arcosegundos de media.
- El nivel electrónico obtiene unos valores muy semejantes al láser tanto en su forma como en su valor numérico, dándose unas diferencias medias en el error de cabeceo de 3,5 arcosegundos.

- En el palpador autocentrante y barras de esferas se presentan unas diferencias medias con el interferómetro de $8\text{ }\mu\text{m}$ en los errores de posición y de 1 y $4\text{ }\mu\text{m}$ en las desviaciones de rectitud. Las diferencias encontradas entre estos dos métodos pueden deberse a [10]:
 - 1) La influencia de la temperatura sobre el comportamiento geométrico de la barra (posibles dilataciones o contracciones). Esto puede deberse a que no esté suficientemente bien corregida dicha temperatura.
 - 2) El proceso de ensayo es diferente en ambos casos (movimiento del cabezal de la máquina, fig. 6.1-1). En el láser, el cabezal sigue una trayectoria lineal mientras que en el método de la barra, la trayectoria seguida por el palpador solidario al cabezal es una combinación de dos movimientos: de avance y de palpado.
 - 3) Errores en la calibración de las esferas de la barra.
 - 4) Errores de medición del palpador (error de coseno)

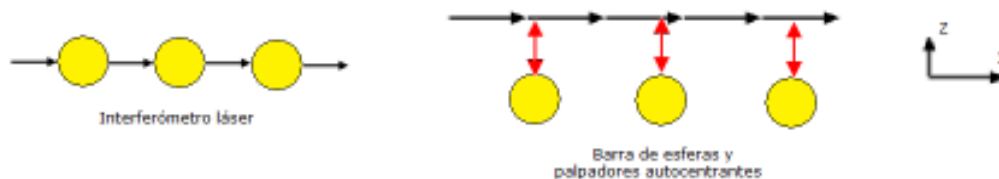


Figura 6.1-1 Movimientos del cabezal en la fresadora durante el ensayo

- En el caso del láser-tracker las diferencias medidas con el interferómetro láser han sido de $12\text{ }\mu\text{m}$ para errores de posición y de $2\text{ }\mu\text{m}$ en los errores de rectitud. Esta diferencia sin embargo se puede deber al modelo matemático de cálculo del error, pues es una primera aproximación que precisa incorporar modelos más complejos y un estudio más extenso y completo que resulte en un cálculo más preciso. Los datos originales obtenidos por el aparato presentan una fiabilidad de $1,26\text{ }\mu\text{m}$, lo que demuestra la posibilidad de encontrar unos errores más ajustados si se mejora el modelo matemático.
- El láser-tracker y el palpador autocentrante pasan a ser métodos económicamente más rentables. Esta tendencia seguirá afianzándose puesto que las empresas buscan máquinas más eficientes y por lo tanto con mayor producción horaria, desfavoreciendo al interferómetro que precisa mucho más tiempo en la verificación y consecuentemente mayor paro productivo.

Por último se crean los programas informáticos que servirán como ayuda a los trabajos futuros que se realicen relacionados con el tema de verificación de máquina-herramienta. En primer lugar se ha creado un programa en Visual Basic que genera un

código numérico en un formato compatible con la máquina (*.pim) de forma que pueda ser introducido directamente en el control de la misma. Mediante este programa el usuario puede elegir distintas opciones para crear un volumen de trabajo por el cual se moverá la máquina parando en los puntos establecidos. Además incorpora botones de ayuda que explican detalladamente cuál es la función de cada una de las opciones y avisa cuando se introduce un valor no válido en cualquiera de los campos, borrándolo y dando la oportunidad de introducir de nuevo un valor en el formato deseado. Por último también avisa cuando se intenta iniciar el programa sin introducir alguno de los datos requeridos.

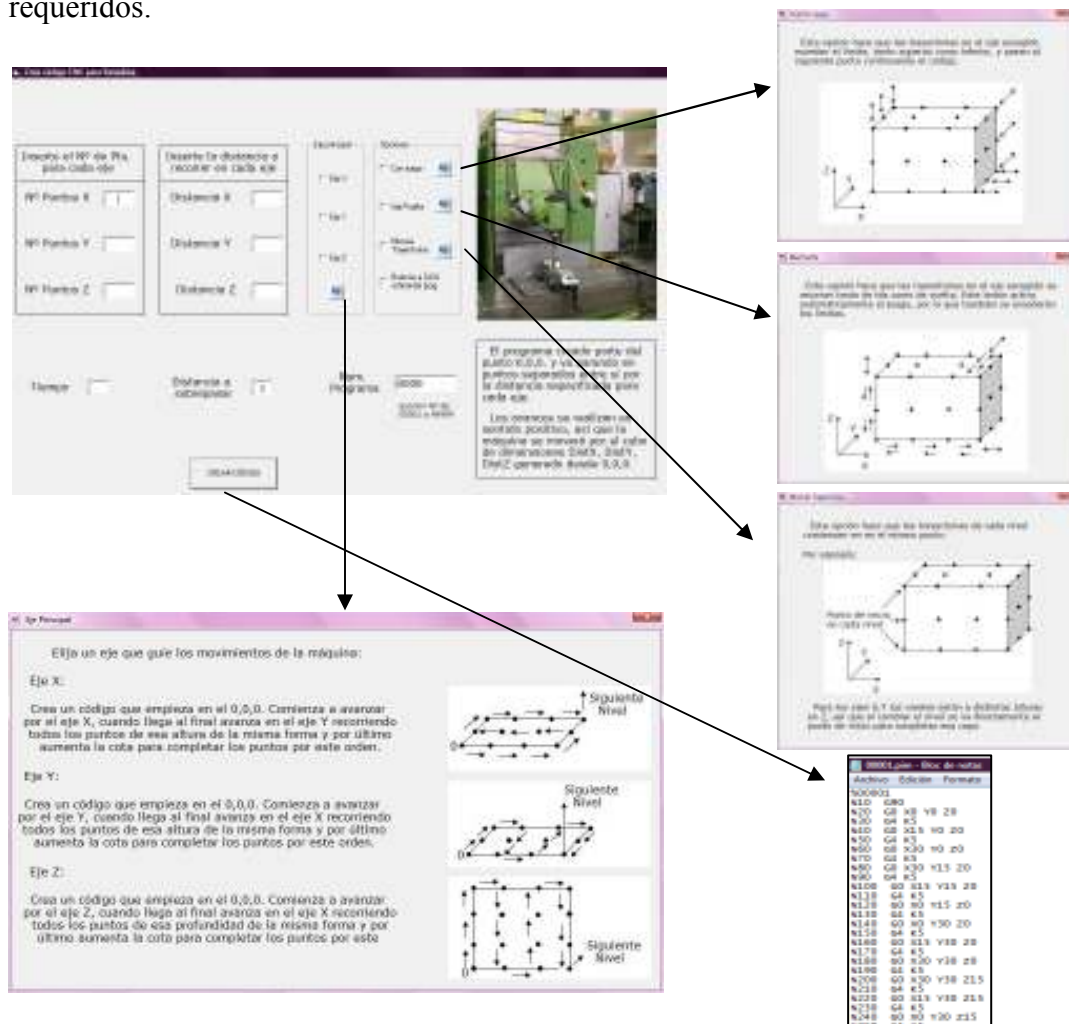


Figura 6.1-2 Programa generador de código CNC

En segundo lugar, se genera un segundo programa en Visual Basic que calcula los parámetros de compensación para poder rellenar de forma fácil y rápida la tabla de compensación existente en la mayoría de controles de máquina-herramienta. Mediante la introducción de los errores calculados en los puntos de compensación, el programa devuelve los parámetros a introducir en el control. En esta primera versión se permite compensar únicamente los movimientos en el eje X, pues es el único eje verificado, y por lo tanto es en este eje en el único en el que es posible calcular una tabla de compensación.

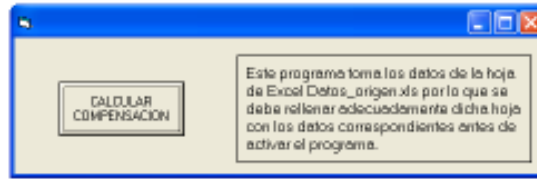


Figura 6.1-3 Programa generador de tabla de compensación

6.2 Trabajos futuros

Basándose en los resultados y conclusiones obtenidas en este proyecto fin de carrera, se puede profundizar en distintas líneas de investigación. De hecho los programas creados sirven como base para futuros proyectos planteados por el Departamento de Ingeniería de Diseño y fabricación de la universidad de Zaragoza.

- Estudio de nuevos modelos de error que integren no solo componentes de error geométrico, sino que incorporen efectos producidos por el calor y la dinámica. Los modelos geométricos se basan en situaciones cuasiestáticas y térmicamente estables y por lo tanto no miden los efectos elásticos y térmicos que aparecen durante el proceso de mecanizado
- Analizar de manera más detallada las posibles causas en las diferencias encontradas entre los diferentes métodos mediante la realización de ensayos basados en un diseño de experimentos.
- Generar un proceso de compensación de errores por pos-procesador mediante la toma de datos con un láser-tracker. Partiendo de la toma de datos en los puntos generados por el programa creado, sería recomendable completar el código hasta conseguir comunicación directa con la máquina de forma que se modificara directamente el código CNC introducido en ella compensando así los errores cometidos.
- Completar el programa de generación de parámetros de compensación de forma que consiga encontrar la compensación del error en cualquier punto del volumen, la primera versión solo compensa el eje X. Además una comunicación directa con el control de forma que se complete automáticamente la tabla, agilizaría mucho el proceso y completaría por sí mismo un proceso de compensación.
- Encontrar un modelo de cálculo del error con láser-tracker más preciso y que permita calcular los 21 errores geométricos existentes en la máquina-herramienta.

Bibliografía

1. Arnone, M. “Mecanizado Alta Precisión y Gran Precisión”, 1998
2. Baldo, CR. “Development of Measurement Strategies for the Assesment of Measurement Uncertainty and Error Components of Machine Tools in Autonomous Production Cells”. Aachen, January of 2002.
3. De Sousa, A. R. “Padroes Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geometrica de Centros de Usinagem”. Tesis Doctoral, POSMEC, UFSC Florianópolis, 2000
4. Eman, K. F.; Wu, B. T. “A generalized Geometric Error Model for Multi-axis Machines”. Annals of the CIRP, vol. 36, nº1, 1987, pp. 253-256.
5. Frank, T., Lunz, E. “Eje de accionamiento de alta velocidad con usillos a bolas” revista “antriebstechnik” Cuaderno nº 1, enero 1998 (Ed. Fachveriage)
6. Guillomia, D. “Diseño de un palpador de medida directa para la verificación de Máquina Herramienta” Proyecto Fin de Carrera, CPS, Zaragoza. 2001
7. Hernández, O.I.; Trapet, E. “Medición de Errores Geométricos Sistemáticos en Máquinas de Medición por Coordenadas. Workshop sobre Máquinas de Medir por Coordenadas”. México. Mayo 2002.
8. Hocken, B. “Calibration of Measuring Machines and Machine Tools”, UNC Charlotte.
9. J.-P. Kruth, L. Zhou, C. Van den Berg and Vanherck. “A Method for Squareness Error Verification on a Coordinate Measuring Machine”. Advanced manufacturing technology, pp. 874-878. 2003
10. Marco Romanos, J.M. “Análisis y comparación experimental de diferentes métodos de verificación geométrica de máquinas-herramienta” Proyecto Fin de Carrera, CPS, Zaragoza. 2004.
11. Maxham, D. “Using a Laser-tracker for machine tool Volumetric Error Compensation” Quality Digest Magazine (qualitydigest.com), Inside Metrology Articles. 26/10/2009
12. Slocum, A.H. “Precision Machine Design”. Ed Prentice Hall, New Jersey, 1992.
13. UNE 15300 (6 partes). Código de verificación de máquinas-herramienta.

14. Weck. M. “Werkzeugmaschinen Messtechnische Untersuchung und Beurteilung”. Vol 4., VDI-Verlag, Düsseldorf 1985.
15. W. T. Estler, K. L. Edmundson, G. N. Peggs, D. H. Parker “Large-Scale Metrology – An Update” Annals of the CIRP Vol. 51/2/2002
16. Yagüe, J.A., Pastor, J.J., Garcés, A., Aguilar, J.J. “Reducción de la incertidumbre de Medida y Diseño de la Autocalibración para un Sistema Sinérgico de Medida de Alto Rango”, Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación, Universidad de Zaragoza.
17. Zhang, G.X., Zang, Y.F., Tianjin University/China. “A Method for Machine Geometry Calibration using 1-D Ball-Array”, Annals of the CIRP, Vol. 40/1/1991.
18. Zhang. M. “Eine Methodik zur Erfassung und Korrektur der Qualitätsfähigkeitsparameter von Fertigungsintegrierten Koordinatenmessgeräten”. Tesis doctoral, RWTH, Aachen, 1994.
19. Zhang, M., Imkamp, D. “Mathematische Interpretation der 21 einzelnen Komponentenabweichungen von Koordinatenmeßgeräten” 1994

Fuentes electrónicas

20. www.Hammarlaser.com
21. www.Heidenhain.com
22. www.Hexagon.com
23. www.Leica.com
24. www.Mitutoyo.com
25. www.Nikon.com
26. www.Optodyne.com
27. www.Renishaw.com
28. www.Sick.com
29. www.Trioptics.com